



Tác giả: TS. Nguyễn Phạm Hải Huy

Đơn vị công tác: Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Japan

Email: [haihuyrd@gmail.com](mailto:haihuyrd@gmail.com)

Hai Huy Nguyen Pham received the B.E. degree in mechatronics engineering from the Ho Chi Minh City University of Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2012. He received the M.E. and Ph.D degree in engineering from Osaka University, Osaka, Japan in 2015 and 2018, respectively. He involved in terahertz waves measurement using electro-optic sensor from 2013 to 2018. In 2018, he joined Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Tokyo, Japan. His study interest includes sensing and detecting technologies for biological applications based on electronics, photonics, and biotechnologies. He received the Best Poster Award from MTA2015/TeraNano-6 and the Best Poster Award from PEM in 2015. He is a member of JSAP and APS.

<https://doi.org/10.15625/vap.2021.0004>

## Giới thiệu tổng quan nghiên cứu về tiềm năng ứng dụng sóng Terahertz

Nguyễn Phạm Hải Huy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Japan

*\* This report is an author's review. It is not related to the author's affiliation (Báo cáo này là bản review của cá nhân tác giả và không có liên quan tới đơn vị mà tác giả đang công tác)*

### TÓM TẮT:

Ngày nay trên đường đi ra ga Tokyo đón tàu về nhà, chúng ta có thể nói chuyện và nhìn thấy trực tiếp hình ảnh người thân đang ở Việt Nam cách hơn 4000 km chỉ với một thiết bị nhỏ gọn trong lòng bàn tay, smart phone. Một trong những công nghệ cốt lõi hiện thực hóa điều kỳ diệu đó là truyền thông vô tuyến dựa vào sóng điện từ. Khởi nguồn của công nghệ này là nhà Nobel vật lý G. Marconi, người đã truyền tín hiệu viễn thông đầu tiên xuyên qua biển Atlantic năm 1901. Với sự phát triển bùng nổ của internet và ứng dụng của nó như VR/AR, autonomous driving, IoT nhu cầu về tốc độ truyền thu dữ liệu sẽ nhanh chóng vượt qua khả năng đáp ứng của công nghệ 4G hay 5G. Trên dải tần sóng điện từ có một vùng được xem là khoảng trống chưa được sử dụng cho đến những thập niên gần đây: Terahertz (THz). Sóng THz có tần số trong khoảng 0.1–10 THz có tiềm năng lớn đưa công nghệ truyền thông vô tuyến lên một tầm mới vì băng thông rộng hơn và là dải tần chưa được khai phá. THz wave nằm giữa dải tần sóng radio và ánh sáng, thừa hưởng đặc tính thú vị sóng hạt của cả hai dải tần hàng xóm. Bài viết này sẽ giới thiệu cái nhìn tổng quan và tiềm năng ứng dụng của sóng THz. Một số lab và viện nghiên cứu tiêu biểu ở Nhật cũng được giới thiệu.

**Từ khóa:** Terahertz wave, wireless communication, nondestructive imaging, sensing

### 1. Giới thiệu

#### 1.1 Sóng điện từ

Bức xạ điện từ (electromagnetic radiation) được định nghĩa là một dạng dao động của điện trường và từ trường có khả năng băng qua không gian mà không cần kết nối vật lý. Bức xạ nhiệt, ánh sáng, và sóng radio đều là bức xạ điện từ. Bức xạ điện từ truyền năng lượng trong chân không ở tốc độ  $c = 3.108 \text{ m/s}$ . Quang phổ điện từ (electromagnetic spectrum) là tập hợp tất cả các bức xạ điện từ ở tất cả các tần số (frequency, đơn vị là Hz) khác nhau. Bên cạnh các nguồn tài nguyên tự nhiên như đất, khoáng, nước, không khí, dầu mỏ, rừng, v.v... quang phổ điện từ cũng là một nguồn tài nguyên tự nhiên [1]. Khác với các nguồn tài nguyên hữu hạn, quang phổ điện từ được xem là nguồn tài nguyên vô hạn, không cạn kiệt và có thể tái sử dụng ngay lập tức. Ví dụ khi tắt một thiết bị đang sử dụng ở một tần số nào đó thì tần số đó lập tức có thể được tái sử dụng bởi một thiết bị khác. Không gian, thời gian và tần số là ba đại lượng vật lý liên quan đến nhau của sóng điện từ. Để tránh hiện tượng nhiễu do giao thoa, cùng một tần số và cùng thời gian phải sử dụng ở địa điểm khác nhau, cùng một tần số và cùng địa điểm phải sử dụng ở thời gian khác nhau,

ở cùng một nơi và cùng một thời điểm hai tần số khác nhau có thể sử dụng. Hình 1 giới thiệu tên của các dải tần được phân loại theo tần số hay bước sóng và một số ứng dụng điển hình trong thực tế. Các sóng điện từ có tần số thấp hay bước sóng dài có năng lượng eV thấp có biểu hiện rõ đặc tính sóng như là phản xạ, giao thoa, nhiễu xạ, v.v... và thu phát điều khiển bằng công nghệ điện tử (electronics). Tần số cao có bước sóng ngắn năng lượng eV cao biểu hiện rõ đặc tính hạt như là truyền thẳng, tán xạ, hội tụ, photon, ion hóa, v.v... và thu phát điều khiển bằng công nghệ quang tử (photonics).

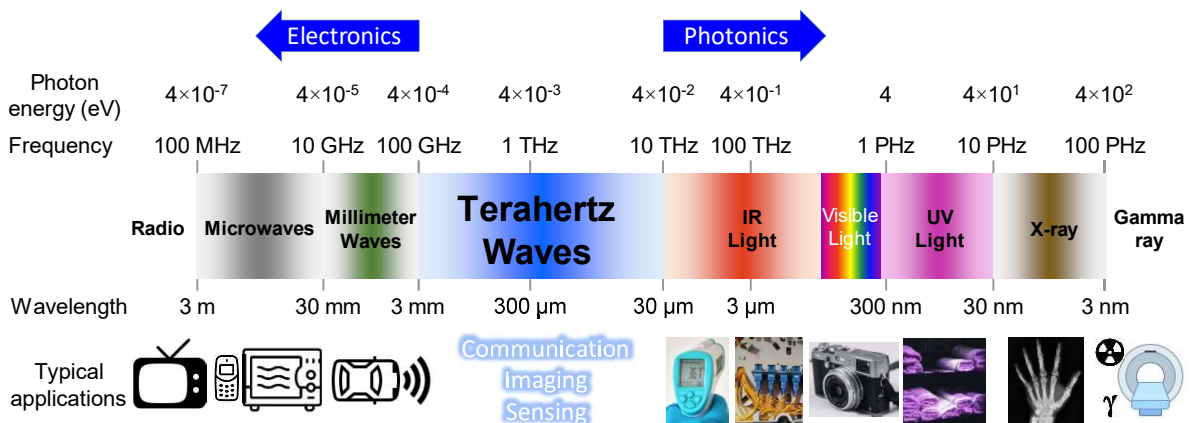
Mỗi dải tần của sóng điện từ đều đóng góp vào ứng dụng thực tế dựa vào đặc tính tự nhiên của nó. Sóng radio sử dụng cho truyền hình TV và đài radio với phạm vi phủ sóng rộng vì có thể truyền dễ dàng trong không khí không bị hấp thụ bởi những phân tử như nước, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, và có khả năng phản xạ ở bầu khí quyển. Microwave sử dụng cho nấu ăn, điện thoại di động, truyền thông vệ tinh vì các phân tử trong thức ăn đặc biệt là nước hấp thụ năng lượng của sóng này và nóng lên, nó cũng dễ dàng truyền qua bầu khí quyển. Sóng millimeter (millimeter wave) được sử dụng cho radar của xe. Tia hồng ngoại (infrared light) dùng để sưởi ấm, camera trong đêm, đo nhiệt độ, và truyền thông cáp quang (fiber-optic communication) vì một số phân tử hấp thụ sóng ở tần số này, mọi đối tượng đều phát ra sóng hồng ngoại, và tổn thất đường truyền trong cáp quang của bước sóng này nhỏ. Ánh sáng khả kiến (visible light) giúp chúng ta nhìn thấy các vật thể, màu sắc qua sự phản xạ của sóng này từ các vật thể vào mắt, nó còn được dùng trong truyền thông (visible light communication). Tia cực tím (ultraviolet light) có khả năng diệt khuẩn, phương pháp kiểm tra thật-giả bằng kích hoạt huỳnh quang (fluorescence) vì khả năng ion hóa cao nhờ năng lượng eV cao. Ion hoá là hiện tượng đánh bật electron ở vỏ nguyên tử và chuyển hoá nó thành ion. Hiện tượng này có thể gây đột biến trong tế bào dẫn đến ung thư. Tia X (X-ray) sử dụng trong chụp ảnh y tế vì khả năng đâm xuyên nhiều vật thể. Sóng  $\gamma$  (Gamma-ray) sử dụng để diệt khuẩn và trị liệu trong y tế vì năng lượng ion hóa rất lớn.

Trong lịch sử, sóng radio được dự đoán từ hệ phương trình Maxwell và được chứng minh bằng thực nghiệm đầu tiên bởi nhà vật lý Heinrich Hertz vào những năm 1880. Vào năm 1901, nhà phát minh kỹ sư Guglielmo Marconi thực hiện truyền tín hiệu viễn thông xuyên qua biển Atlantic 2000 dặm mở đầu sự bùng nổ trong nghiên cứu và ứng dụng sóng radio [2]. Sự tồn tại dải tần hồng ngoại thì được tìm ra bởi nhà thiên văn học, nhạc sĩ Frederick William Herschel năm 1800 bằng nhiệt kế và lăng kính [3]. Tia X được tìm ra bởi giáo sư vật lý Wilhelm Conrad Röntgen năm 1895 bằng cathode-ray tube [4]. Như vậy chúng ta có thể thấy các dải tần ở phần đầu và phần sau của quang phổ điện từ được tìm thấy khá sớm. Từ khi biết các dải tần đó nằm trên cùng một phổ, các nhà khoa học tiêu biểu là giáo sư Rubens và Nichols ghi nhận sự tồn tại của khoảng trống (gap) để nối liền các dải tần trên toàn quang phổ vào năm 1897 [5]. Mảnh ghép để lấp khoảng trống cuối cùng trong quang phổ điện từ là dải tần Terahertz (THz) và mãi đến năm 1923 bức xạ ở tần số này mới được ghi nhận bằng thực nghiệm [6-9].

### 1.2 Sóng Terahertz

Sóng THz thường được định nghĩa là sóng có tần số trong khoảng 0.1–10 THz (1 THz = 10<sup>12</sup> Hz) còn được gọi là T-ray [9–11]. Việc tiếp cận và sử dụng sóng THz đã bị hạn chế một thời gian dài vì khó khăn trong kỹ thuật thu phát sóng này. Ở tần số THz, cả công nghệ electronics và công nghệ photonics đều bị hạn chế về độ nhạy (sensitivity) thấp của thiết bị thu (detector / receiver) và công suất (power) phát thấp của thiết bị phát (source/generator) vì mạch điện tử ở tần số này phải vận hành quá nhanh, kích thước các thiết bị điện tử phải ngày càng nhỏ vì bước sóng càng ngắn, và kỹ thuật quang học ngày trước không phát công suất đủ lớn [7, 8].

Nhờ những bước phát triển đột phá trong cả lĩnh vực điện tử, quang tử, vật liệu, và công nghệ bán dẫn những năm 1990-2000s, sóng THz đã bắt đầu chứng minh được tiềm năng của mình cho các ứng dụng thực tế [12, 13]. Hình 2a chỉ ra số lượng bài viết khoa học



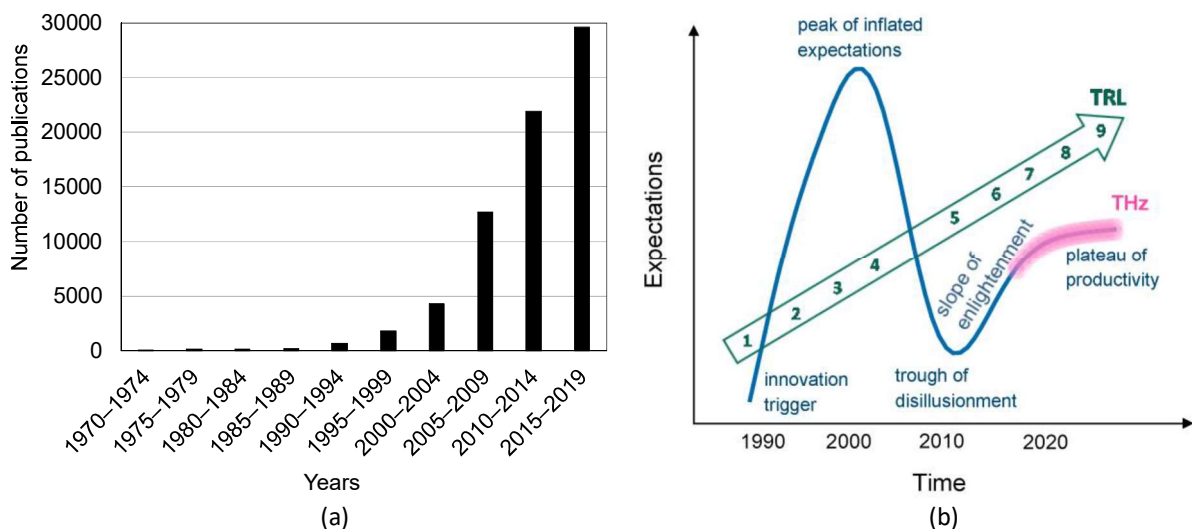
Hình 1. Quang phổ điện từ và một số ứng dụng của các dải tần.

về chủ đề “Terahertz” từ những năm 1970 đến nay tăng sôi động theo hàm mũ. Khảo sát này được thực hiện trên trang web tìm các bài báo khoa học Microsoft Academic (<https://academic.microsoft.com/home>) với từ khóa “Terahertz”. Điều này chỉ ra sự quan tâm đến công nghệ THz ngày càng tăng nhanh vì tiềm năng to lớn của nó trong các ứng dụng thực tế ngày càng rõ hơn. Hình 2b là đồ thị Gartner hype cycle về vòng đời phát triển của công nghệ mới, cụ thể ở đây là công nghệ THz [14]. Nhờ những đột phá trong kĩ thuật công nghệ, kì vọng về sóng THz tăng cao ở những năm 2000s và thoát ra khỏi kì vọng quá mức ở những năm 2010s và đi vào giai đoạn phát triển ổn định và trưởng thành từ những năm sắp đến. Có thể những năm tới chúng ta sẽ bắt đầu được chứng kiến những ứng dụng thực tế của sóng THz dần thành hiện thực. Báo cáo năm 2019 của tập đoàn khảo sát thị trường Frost & Sullivan đã liệt kê công nghệ THz là một trong 50 công nghệ mới nổi [15].

Phạm vi bài viết lần này không tập trung về mặt kĩ thuật nên chỉ liệt kê tên một số những đột phá về mặt kĩ thuật giúp cho việc đem sóng THz gần hơn vào ứng dụng thực tế. Công nghệ phát sóng THz dựa vào quang (optical-to-THz conversion) sử dụng vật liệu phi tuyến tính quang (nonlinear optical material hay electro-optic (EO) material) như CdTe, ZnTe, LiNbO<sub>3</sub>, DAST với điểm nhấn là kĩ thuật “tilted-pulse-front pumping” [16]; sử dụng gas plasma như kĩ thuật “THz air photonics” [17]; và kĩ thuật “photomixing” sử dụng photoconductor (PC) làm từ low-temperature-grown GaAs hay sử dụng photodiode (PD) đặc biệt là uni-traveling-carrier photodiode (UTC-PD) [18]. Sự phát triển của laser phát xung cực nhanh femtosecond laser và quantum cascade laser, một loại semiconductor laser, đã tạo bước đột phá cho công nghệ thu phát sóng THz dựa vào quang [19–21].

Công nghệ phát sóng THz dựa vào điện tử sử dụng kĩ thuật nhân tần số (frequency multiplication) và mạch khuếch đại cao tần [22–24]; sử dụng resonant tunneling diode (RTD) [25, 26]; sử dụng transistor công nghệ cao dựa vào Si, InP, III-V [27]. Công nghệ thu sóng THz sử dụng electronics mixer như bolometer, RTD, Schottky-barrier diode [28, 29]; hay sử dụng photonic mixer như PD, PC, EO, semiconductor quantum dot detector, semiconductor charge-sensitive infrared phototransistor [30]. Về hệ thống thì cả free-space optics [31] và optical-fiber-coupled [32] đều có những đột phá, với ý kiến cá nhân của tác giả thì optical-fiber-coupled sẽ có tiềm năng ứng dụng thực tế nhanh hơn vì hệ thống có thể gọn nhẹ linh động hơn.

Nhờ đặc thù nằm ở giữa sóng radio và ánh sáng trong quang phổ điện từ, sóng THz sở hữu những đặc tính sóng hạt của hai dải tần hàng xóm cũng như sở hữu những đặc tính độc nhất của riêng dải tần này [8–14]. Giống sóng radio, sóng THz có khả năng truyền xuyên nhiều vật liệu như nhựa, giấy, quần áo, gỗ, gốm sứ mà ánh sáng khả kiến và tia hồng ngoại không xuyên được hoặc bị tán xạ [8, 10]. So với sóng radio, sóng THz có tần số cao hơn mang lại băng thông (bandwidth) rộng hơn nên tốc độ truyền dữ liệu (data rate) tính bằng bit/s cao hơn [33, 34]. Ngoài ra bước sóng ngắn hơn sóng radio nên độ phân giải (resolution) khi sử dụng sóng THz trong ứng dụng ảnh (imaging) sẽ cao hơn [13]. Giống ánh sáng, sóng THz có được tính truyền thẳng (directivity) hơn nên thích hợp cho truyền điểm với điểm, an toàn hơn vì tín hiệu không dễ lan sang khu vực khác [33]. So với các sóng có tần số cao hơn, sóng THz có mức năng lượng eV thấp không ion hóa vật liệu nên sẽ an toàn hơn nhất là trong lĩnh vực y tế [35].



**Hình 2.** (a) Số lượng bài báo khoa học gắn với từ khóa “Terahertz”. (b) Đồ thị Gartner hype cycle về sự phát triển của công nghệ mới THz [14] (Reprint permission from open access policy of MPDI).



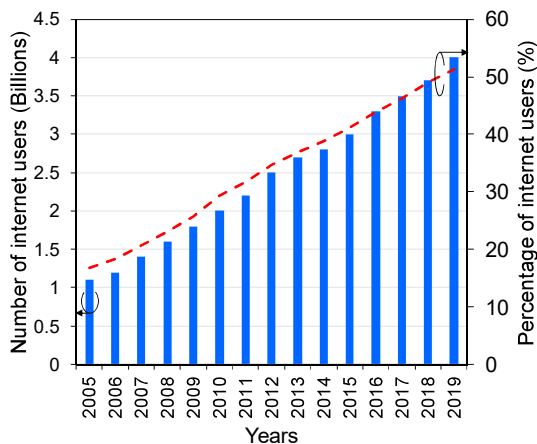
Theo US Federal Communications Commission (FCC), sóng có năng lượng photon lớn hơn 10 eV tương đương bước sóng nhỏ hơn 124 nm sẽ gây ion hóa. Bước sóng THz ngang ngửa với một số kích thước phân tử nên có nhiều vật liệu sở hữu phổ nhận diện (fingerprint spectra) thích hợp cho ứng dụng giám định và nghiên cứu vật liệu không phá hủy (nondestructive inspection) và chẩn đoán [13, 14]. Đặc biệt có một số bước sóng ở dải tần THz được hấp thụ mạnh bởi phân tử nước [8, 12].

Hình 3 chỉ ra một số công nghệ quan trọng để phát triển công nghệ THz cũng như lĩnh vực và ứng dụng thực tế mà sóng THz có thể mang lại. Các công nghệ đó bao gồm ngành vật liệu như công nghệ nano, bán dẫn, chất rắn; ngành điện tử như mạch điện cao tần, truyền tín hiệu, công nghệ viễn thông; ngành quang học như laser, quang-điện (optoelectronics), fiber optics. Bên cạnh phần cứng (hardware), ngành khoa học máy tính, xử lý số liệu cũng rất quan trọng vì lượng thông tin thu thập từ công nghệ THz sẽ nhiều hơn rất nhiều so với trước đây.

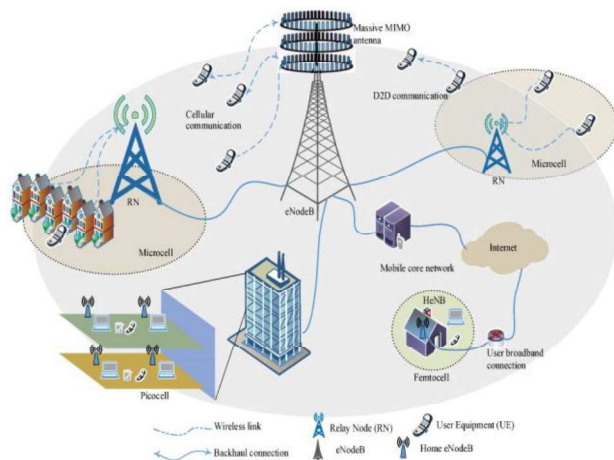
Ngay từ thời điểm sơ khai, sóng THz đã thu hút sự chú ý lớn trong lĩnh vực vũ trụ thiên văn học vì 98% tổng lượng photo phát ra trong lịch sử của vũ trụ từ vụ nổ Big Bang rơi vào dải tần THz [12]. Ngoài ra nhờ những đặc điểm của sóng THz đề cập ở trên, ứng dụng trong truyền thông không dây băng thông siêu rộng (ultra-broadband wireless communication), ứng dụng chẩn đoán giám định trong khoa học sinh học và vật liệu hay trong an ninh rất được kỳ vọng. Trong phần 2 của bài viết này một số nghiên cứu về ứng dụng của sóng THz trong ngành wireless communication và imaging-sensing sẽ được giới thiệu.

## 2. Một số nghiên cứu ứng dụng của sóng THz

### 2.1 Wireless communication

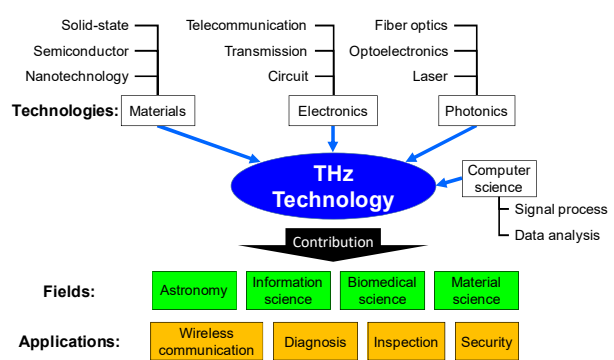


(a)



(b)

**Hình 4.** (a) Số lượng và phần trăm dân số thế giới sử dụng internet theo năm với số liệu tham khảo [36] thời điểm 12/2020. (b) Small cell networks cho công nghệ 5G và 6G tương lai [37] (Reprint permission from open access policy of MPDI).



**Hình 3.** Những công nghệ chủ chốt để phát triển công nghệ THz cũng như một số lĩnh vực và ứng dụng thực tế mà sóng THz có thể mang lại.

Sự ra đời của internet vào năm 1983 như một cuộc cách mạng trong thông tin và kết nối. Mọi người trên khắp Trái Đất được kết nối gần nhau hơn và tốc độ người dùng không ngừng tăng lên. Hình 4(a) cho thấy lượng người dùng internet được biểu thị bằng cột màu xanh và tỉ lệ phần trăm số người dùng internet được biểu thị bằng đường nét đứt màu đỏ tăng gần như tuyến tính mỗi năm. Số liệu thống kê được lấy từ The international telecommunication union (ITU), cơ quan chuyên môn về kĩ thuật thông tin và truyền thông của the United Nations [36]. ITU đánh giá đến cuối năm 2019 thì hơn 51% dân số thế giới tương đương 4 tỉ người sử dụng internet. Chúng ta có thể dễ dàng nội suy ra từ biểu đồ này vào năm 2038 gần như 100% dân số thế giới sẽ sử dụng internet. Với sự xuất hiện của các thiết bị thông minh cầm tay như laptop, smart phone, tablet, cũng như các ứng dụng trải nghiệm mới như virtual/augmented reality (VR/AR), xe tự lái (autonomous driving), Internet of Things (IoT), nhu cầu sử dụng wireless communication tốc độ đường truyền cao cũng ngày càng tăng và được dự đoán sẽ đuổi kịp nhu cầu sử dụng wired communication vào năm 2030 [34]. Hình 4b biểu thị sự kết hợp của wired

**Bảng 1:** Bảng so sánh giữa các mạng từ 1G đến 5G và Wi-Fi, WiGig, Li-Fi tham khảo [38–45].

	1G	2G	3G	4G	5G	Wi-Fi	WiGig	Li-Fi
Year	1980	1990	2001	2010	2020	1997	2009	2011
Carrier frequency	800 MHz	900 MHz	2.1 GHz	2.6 GHz	3.7 GHz, 4.5 GHz, 28 GHz	2.4 GHz, 5 GHz	60 GHz	4–8 THz
Bandwidth	30 kHz	30 – 200 kHz	15 – 20 MHz	15 – 20 MHz	600 MHz	20 – 40 MHz	2.16 GHz	~300 GHz (Expected)
Speed	2 Kbps	64 Kbps	2 Mbps	0.2 – 1 Gbps	> 1 Gbps	150 – 600 Mbps	~7 Gbps	> 1 Gbps (Expected)
Service	Voice only	Voice, data	Voice, data, audio and video calls	Voice, data, audio, video calls, HD TV, and streaming	Voice, data, audio, video calls, HD TV, streaming, and UHD video	Internet access for devices and equipment	Internet access for devices and equipment, HD streaming	Restricted RF place like hospital, underwater

communication (đường liền) và wireless communication (đường chấm) cho mạng 5G và 6G trong tương lai với công nghệ kết hợp nhiều small cell networks (HetNet) [37]. Chúng ta có thể thấy ngoài kết nối giữa trạm chính với trạm trung gian hay tòa nhà, các kết nối giữa thiết bị với nhau hay các thiết bị với các trạm đều là wireless communication.

Bảng 1 tóm tắt so sánh giữa các mạng cellular từ 1G đến 5G và mạng Wi-Fi, WiGig, Li-Fi [38–45]. Trung bình 10 năm sẽ xuất hiện thế hệ mạng tiếp theo cùng với tốc độ truyền tải dữ liệu tăng lên từ vài Kbps (1 Kbps =  $10^3$  bit/s) đến vài trăm Mbps (1 Mbps =  $10^6$  bit/s) và có tiềm năng đạt hơn 1 Gbps (1 Gbps =  $10^9$  bit/s). Cùng với đó loại dịch vụ cung cấp cũng đa dạng và phức tạp hơn từ chỉ có giọng nói đến truyền tải dữ liệu, UHD video, hay live stream. Mỗi thế hệ công nghệ sẽ có những bước đột phá kỹ thuật quan trọng như chuyển đổi từ analog qua digital, cách thức mã hóa điều chế (modulation) phức tạp hơn, nâng cao kỹ thuật xử lý tín hiệu số (digital signal processing). Tuy nhiên chúng ta cũng có thể nhận thấy tần số sóng mang (carrier frequency) ngày càng cao hơn giúp cho băng thông được sử dụng rộng hơn từ 30 kHz lên đến 600 MHz. Về cơ bản, carrier frequency ở tần số cao sẽ có băng thông rộng nên chở được nhiều dữ liệu đi cùng một lúc hơn và hơn nữa tần số cao là tài nguyên chưa được phân bổ hay khai thác. Đối với mạng Wi-Fi chúng ta cũng thấy điều đó được áp dụng khi nâng cấp lên WiGig, dải tần millimeter wave ở 60 GHz đã được sử dụng làm tăng tốc độ lên hơn 10 lần Wi-Fi. Điều gì sẽ xảy ra nếu ta sử dụng tần số của ánh sáng nơi mà băng thông lớn hơn 1000 lần? Năm 2011, khái niệm Li-Fi (light-fidelity) được đưa ra với việc sử dụng ánh

sáng cho wireless communication. Lợi thế là tiềm năng tốc độ truyền tải dữ liệu rất cao và có thể được sử dụng ở những nơi không dùng được sóng radio như bệnh viện vì sóng radio có thể làm nhiễu các thiết bị điện tử nhạy. Tuy nhiên hạn chế của Li-Fi là sẽ bị cản bởi các vật dụng thông thường như quần áo, giấy, nhựa và dễ bị nhiễu từ nguồn sáng khác.

Bảng 2 so sánh việc sử dụng các dải tần khác nhau cho ứng dụng wireless communication [34]. Mỗi dải tần sẽ có ưu nhược điểm và phạm vi ứng dụng phù hợp khác nhau. Ngoài những ưu điểm về bandwidth, data rate, directivity của sóng THz trình bày ở phần 1.2. Một ưu điểm nữa là hiệu quả năng lượng trên bit truyền tính theo đơn vị bps/W ở tần số cao sẽ cao hơn [46, 47]. Lưu ý là hiệu quả năng lượng truyền tin hiệu trong thông tin truyền thông sẽ trở thành chủ đề quan trọng trong thời gian sắp đến vì tốc độ truyền tin và lượng người dùng không ngừng tăng lên, báo cáo [47] ước lượng 1000 hộ sử dụng internet với tốc độ 1 Gbps sẽ cần 1 GW =  $10^9$  Watt năng lượng. Ngoài ra so với ánh sáng, sóng THz không bị nhiễu bởi ánh sáng khác vì tần số THz khác xa tần số ánh sáng xung quanh, cũng như không bị chặn bởi một số vật liệu thông thường.

Các thí nghiệm về wireless communication bằng sóng THz ở một số trường đại học, các viện nghiên cứu, các công ty tư nhân đã và đang đạt được những kết quả ấn tượng [34]. Bảng 3 tóm tắt một số kết quả nghiên cứu đó. Cả hai công nghệ dựa vào quang tử (các hàng màu vàng ở trên) và điện tử (các hàng màu xanh lá cây ở dưới) đều đạt được tốc độ truyền tin ở bậc Gb/s ở khoảng cách gần vài centimeters đến xa vài chục meters. Ở khoảng cách xa sẽ gặp khó khăn hơn vì yêu

**Bảng 2.** Bảng so sánh các dải tần sóng sử dụng cho wireless communication [34] (Reprint permission from open access policy of MPDI).

Technology	Millimeter Wave	Terahertz	Infrared	Visible Light	Ultra-Violet
Data Rate	Up to 10 Gbps	Up to 100 Gbps	Up to 10 Gbps	Up to 10 Gbps	Few Gbps
Range	Short range	Short range – Medium range	Short range – long range	Short range	Short range
Power Consumption	Medium	Medium	Relatively low	Relatively low	Expected to be low
Network Topology	Point to Multi-point	Point to Multi-point	Point to Point	Point to Point	Point to Multi-point
Noise Source	Thermal noise	Thermal noise	Sun Light + Ambient Light	Sun Light + Ambient Light	Sun Light + Ambient Light
Weather Conditions	Robust	Robust	Sensitive	–	Sensitive
Security	Medium	High	High	High	To be determined

**Bảng 3.** Một số kết quả đạt được trong nghiên cứu ứng dụng sóng THz vào wireless communication.

Technology	Frequency band	Channel	Speed	Distance	Bit error rate	Modulation technique	Reference
UTC-PD	200-GHz	4	100 Gb/s	2 cm	$10^{-5}$	QPSK	[48]
UTC-PD	300-GHz	1	100 Gb/s	0.5 m	$10^{-6}$	16QAM	[49]
UTC-PD	300-GHz	1	50 Gb/s	100 m	$10^{-3}$	OOK	[50]
			30 Gb/s		$10^{-11}$		
UTC-PD	300–500 GHz	6	260 Gb/s	0.5 m	$10^{-3}$	16QAM	[51]
UTC-PD	600-GHz	1	10 Gb/s	1.5 cm	$10^{-11}$	OOK	[52]
CMOS	130-GHz	1	11 Gb/s	3 m	$10^{-9}$	ASK	[53]
MMIC	240-GHz	1	64 Gb/s	40 m	$10^{-5}$	QPSK	[54]
InP-HEMT	300-GHz	1	100 Gb/s	2.22 m	$10^{-3}$	16 QAM	[55]
RTD	500-GHz	1	34 Gb/s	1 cm	$10^{-3}$	ASK	[56]

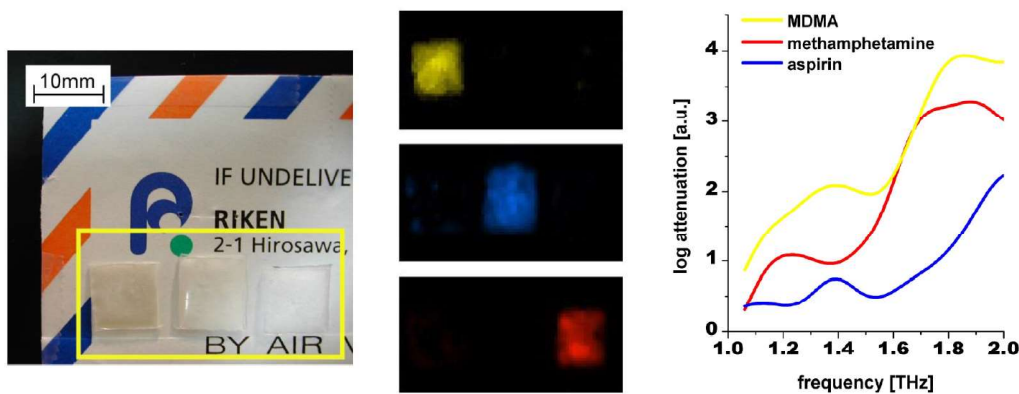
cao hơn. Truyền tin bằng công nghệ quang tử có điểm lợi là có thể ứng dụng hệ thống THz vào hệ thống optical fiber hiện hành, còn công nghệ điện tử sẽ giúp thiết bị nhỏ gọn tiện lợi hơn. Việc kết hợp nhiều channel còn gọi là multi-carriers giúp đạt được tổng tốc độ truyền nhanh hơn như 260 Gb/s với 6 channels [51]. Sử dụng tần số cao như dải tần 500–600 GHz có tiềm năng tăng tốc độ truyền nhanh nhưng khó khăn trong việc chế tạo thiết bị cũng tăng. Việc sử dụng các phương pháp modulation phức tạp như QPSK, 16 QAM, 64 QAM, v.v... giúp tốc độ truyền tăng lên 2, 4, 6, v.v... lần phương pháp modulation cơ bản OOK hay ASK. Tất nhiên modulation phức tạp hơn sẽ yêu cầu signal-to-noise ratio cao hơn. Các đề tài nghiên cứu sóng THz cho wireless communication vẫn sẽ tiếp tục sôi động trong thời gian tới.

### 2.2 Imaging-sensing

Lĩnh vực ứng dụng sóng THz vào imaging và sensing đã được quan tâm và nghiên cứu hơn 20 năm [57] với những đột phá trong công nghệ được khởi đầu vào năm 1995 khi hệ thống THz time-domain spectroscopy (TDS) được sử dụng thành công cho ứng dụng imaging [58]. Spectroscopy là kỹ thuật đo đặc tính như độ hấp thụ (absorption) và/hoặc độ khuếch xạ

(refractive index) của vật liệu biến thiên theo các tần số ở một dải tần. Cũng đã được tóm lược ở phần 1.2, sự thu hút của ứng dụng sóng THz vào lĩnh vực imaging và sensing là vì những lợi ích sau đây [57, 59, 60]: (1) độ phân giải trong khoảng micromere đến mm; (2) xuyên nhiều vật liệu; (3) bức xạ không gây ion hóa; (4) có nhiều vật liệu sở hữu đặc tính nhận diện; (5) bước sóng dễ bị hấp thụ bởi các phân tử phân cực (polar molecules) như nước; (6) có tần số gần với tần số dao động nội phân tử (intramolecular vibration) của một số phân tử vô cơ và hữu cơ.

Nhờ những đặc điểm liệt kê ở trên, một trong những ứng dụng được kì vọng nhất của sóng THz trong lĩnh vực imaging-sensing là kiểm định không phá hủy. Hình 5 là một ví dụ về sử dụng công nghệ THz imaging và spectroscopy để giám định các loại thuốc bất hợp pháp với khoảng 20 mg mỗi loại để trong túi nhựa giấu trong phong bì thư [61]. Đây là một ứng dụng điển hình về tiềm năng của sóng THz trong ứng dụng kiểm định vì việc sử dụng dải tần thấp hơn như millimeter wave thì thiếu đặc tính nhận diện và độ phân giải thấp; còn sử dụng dải tần cao hơn như infrared light thì có đặc tính nhận diện nhưng bị tán xạ hoặc không xuyên được vật liệu bao bọc; X-ray thì không nhận diện được là chất gì và gây ion hóa nguy



**Hình 5.** Sử dụng sóng THz để giám định chất khả nghi trong phong bì thư, từ trái qua: MDMA (thuốc lắc), aspirin, và methamphetamine (chất kích thích), cả ba loại đều được nhận diện [63] (Reprint permission from open access policy of OSA).



hiêm [61]. Trong hình 5, hình bên phải là biểu đồ spectroscopy thể hiện độ absorption của sóng THz ở các tần số đối với từng loại chất. Ở một số tần số có độ hấp thụ gần giống nhau nhưng ở tần số khác thì khác nhau. Sau khi đo và kết hợp thông tin từ các tần số ở từng điểm ảnh ta có thể xác định được trong phong bì có chất gì ở vị trí nào như hình ở giữa trong hình 5. Khả năng nhận diện các chất gây nổ hay các loại thuốc bất hợp pháp khác bằng sóng THz cũng được nghiên cứu [62–65]. Bên cạnh đó, ứng dụng nondestructive inspection của sóng THz còn được áp dụng vào ngành nông nghiệp thực phẩm [66, 67] như kiểm tra chất lượng trong chocolate [68], bột [69], phân biệt dầu ăn sạch và bẩn [70], xác định hàm lượng thuốc bảo vệ thực vật [71], và bằng cách kết hợp với kỹ thuật machine learning có thể xác định sản phẩm biến đổi gene [72].

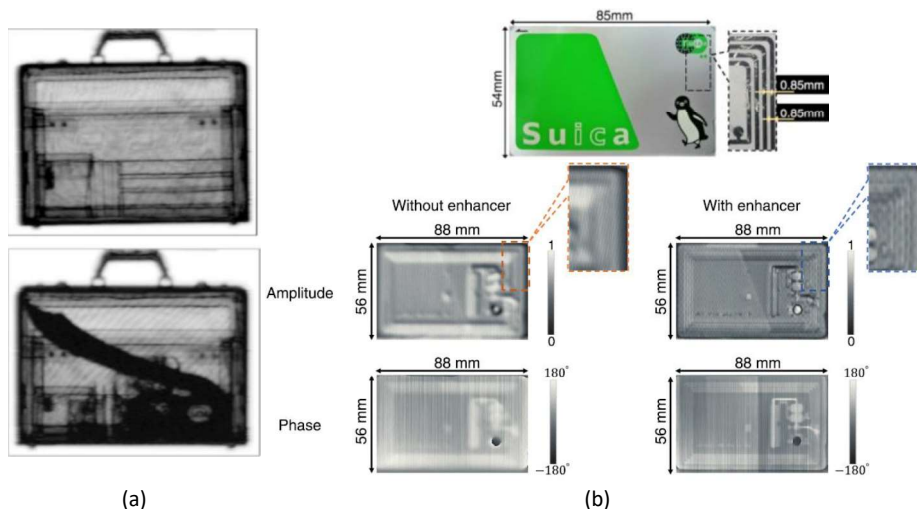
Trong công nghiệp, kiểm định chất lượng giấy về độ dày và độ ẩm bằng sóng THz đã được thử nghiệm trong dây chuyền sản xuất [73–75]. Trong ngành công nghiệp nhựa, đã có những nghiên cứu xác định thành phần [76, 77], độ ẩm [78], hay chất lượng mối hàn nhựa có lẫn kim loại, cát, không khí hay không [79, 80]. Trong công nghiệp bán dẫn, sóng THz cũng được sử dụng để đánh giá các đặc tính vật lý (mobility, conductivity, carrier density, plasma oscillations) [81–84]. Với khả năng nhận biết được chất và độ dày, sóng THz còn được thử nghiệm với các tác phẩm nghệ thuật cổ như xác định màu vật liệu, từng lớp giấy của tranh [85, 86], hay giám định bên trong các bình chậu mà không cần mở ra [87, 88]. Ngoài ra việc kết hợp sóng THz với kỹ thuật khác cho ra đời những công nghệ mới như laser Terahertz emission microscopy (LTEM) cho biết thông tin về phản ứng của sóng THz với mẫu vật và hình ảnh có độ phân giải cao của bước sóng laser chứ không bị giới hạn bởi độ phân giải thông thường của bước sóng THz [57, 89–91]. THz-STM (scanning tunneling microscopy) là một ví dụ khác về sự kết hợp

STM với sóng THz tạo nên một công nghệ giúp quan sát bề mặt với độ phân giải không gian ở bậc nguyên tử (STM) và spectroscopy với độ phân giải thời gian femtosecond (THz) [92–94].

Một ứng dụng nổi bật khác của imaging-sensing bằng sóng THz là biomedical science. Sóng THz cho thấy tiềm năng nhận diện ung thư da [35, 95], ung thư vú [96, 97], đánh giá độ sâu vết thương bỏng [98], đo độ khô của mắt [99], phân định khối u não gliomas cấp II-III-IV mà không cần chất tương phản [100]. Ứng dụng sóng THz vào ngành dược phẩm cũng đang được kì vọng vì nhiều hợp chất hóa học và phản ứng có thể nhận định được ở dải tần này [101–104]. Tuy nhiên vẫn còn cần nhiều nghiên cứu cơ bản để hiểu bản chất sự tương tác của các chất này với sóng THz để tăng độ tin cậy của ứng dụng công nghệ THz vào một ngành quan trọng và nhạy cảm như life science.

Dựa vào một số đặc tính quan trọng của sóng THz được trình bày xuyên suốt từ phần mở đầu như có thể xuyên qua nhựa, giấy, quần áo, nhiều chất mang đặc tính nhận diện ở dải tần này, cũng như khả năng được sử dụng an toàn đối với con người vì sóng không gây ion hóa, tiềm năng ứng dụng sóng THz trong lĩnh vực an ninh được kì vọng lớn [57, 60]. Khả năng giám định được vũ khí trong vali [105–107] hay trong các vật chứa [108, 109] bằng sóng THz hay THz camera đã được thử nghiệm. Hình 6a biểu thị một ví dụ chụp ảnh bên trong vali ở tần số 0.2 THz [105]. Chúng ta có thể nhận thấy rõ ràng sự khác biệt của hình vali trống ở phía trên và hình vali bên dưới chứa đựng một số vật nguy hiểm như dao.

Một số thử thách của ứng dụng THz imaging-sensing vào thực tế có thể kể đến là công suất sóng THz còn thấp trung bình ở mức  $\mu\text{W}$  đến  $\text{mW}$  và tần số càng cao công suất càng giảm. Nhiều kỹ thuật trong cả quang tử và điện tử đang được nghiên cứu để cải thiện



**Hình 6.** (a) Hình được đo bằng sóng THz ở tần số 0.2 THz vali trống ở trên, vali đựng dao và các vật khác ở dưới [105] (Reprint permission of AIP Applied Physics Letters). (b) Hình mạch điện bên trong thẻ đi tàu ở Nhật được đo ở tần số 0.125 THz bằng kỹ thuật tăng độ phân giải Terajet [114] (Reprint permission from open access policy of AIP APL Photonics).

công suất được tóm tắt trong lộ trình công nghệ THz 2017 [110]. Bên cạnh đó kỹ thuật tăng độ phân giải mà không cần tăng tần số THz bằng cách sử dụng những công nghệ quang tử [111–114] như near-field probe, surface plasmon, và Terajet hay sử dụng công nghệ tính toán [115, 116] cũng cho thấy nhiều triển vọng. Hình 6b thể hiện ảnh nondestructive mạch điện bên trong thẻ đi tàu ở Nhật với tần số 0.125 THz nhưng có độ phân giải tốt hơn 2 lần thông thường [114]. Một thử thách khác là tốn nhiều thời gian đo để có được ảnh bằng sóng THz. Một số nghiên cứu về phát triển array detectors [117, 118] hay kỹ thuật đo compressive sensing [119, 120] để giảm thời gian đo cũng dần đạt

kết quả khả quan. Video với tốc độ 25 hình/giây ở tần số 0.35 THz ở khoảng cách 5–25 m cho ứng dụng an ninh đã được thử nghiệm [121].

### 3. Một số lab, viện nghiên cứu, và công ty tiêu biểu của Nhật Bản nghiên cứu về sóng THz

Bảng danh sách dưới đây tóm tắt một số lab ở trường đại học, các viện nghiên cứu, và công ty tiêu biểu đang hoặc đã làm về công nghệ sóng THz. Chủ đề nghiên cứu được phân cơ bản thành 3 loại: thiết bị (device), hệ thống phần cứng (system), và ứng dụng (applications).

**Bảng 4.** Danh sách các trường đại học và viện nghiên cứu tiêu biểu

TT	Trường Đại học/ Viện nghiên cứu	Lab	Lĩnh vực	Đường link
1	Osaka University	Nagatsuma	Devices & systems	<a href="http://ipg-osaka.com/en/research.html">http://ipg-osaka.com/en/research.html</a>
2		Tonouchi	Devices & systems	<a href="https://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/THP/HPE/index.html">https://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/THP/HPE/index.html</a>
3		Ashida	Devices	<a href="https://laser.mp.es.osaka-u.ac.jp/en_research.html">https://laser.mp.es.osaka-u.ac.jp/en_research.html</a>
4		Yoshimura/ Nakajima	Devices	<a href="https://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/thz/index.html">https://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/thz/index.html</a>
5	Tohoku University	Otsuji	Devices & systems	<a href="http://www.otsuji.riec.tohoku.ac.jp/english/index_en.php?page=research">http://www.otsuji.riec.tohoku.ac.jp/english/index_en.php?page=research</a>
6		THz and Bio Engineering	Systems & Applications	<a href="https://www.agri.tohoku.ac.jp/thz/index3.html">https://www.agri.tohoku.ac.jp/thz/index3.html</a>
7	Tokyo Institute of Technology	Suzuki	Devices	<a href="http://www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/index.html">http://www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/index.html</a>
8		Asada	Devices	<a href="http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/study.html">http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/study.html</a>
9		Kawano	Devices	<a href="http://diana.pe.titech.ac.jp/kawano/eng/index.html">http://diana.pe.titech.ac.jp/kawano/eng/index.html</a>
10	Keio University	Monnai	Devices	<a href="https://www.hz.appi.keio.ac.jp/index.php/research-jp/">https://www.hz.appi.keio.ac.jp/index.php/research-jp/</a>
11		Watanabe	Systems	<a href="http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/watanabe/english/index_e.html">http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/watanabe/english/index_e.html</a>
12	Kyoto University	Solid state spectroscopy	Systems	<a href="http://www.hikari.scphys.kyoto-u.ac.jp/en/index.php?Solid%20State%20Spectroscopy%20Group">http://www.hikari.scphys.kyoto-u.ac.jp/en/index.php?Solid%20State%20Spectroscopy%20Group</a>
13		Integrated function engineer	Devices	<a href="http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/">http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/</a>
14	Hokkaido University	Condensed matter dynamics	Systems	<a href="http://phys.sci.hokudai.ac.jp/LABS/hikari/index.html">http://phys.sci.hokudai.ac.jp/LABS/hikari/index.html</a>
15	The University of Tokushima	Yasui/ Minamikawa	Systems	<a href="https://femto.me.tokushima-u.ac.jp/eng/research/index.html">https://femto.me.tokushima-u.ac.jp/eng/research/index.html</a>
16	Kobe University	Sato	Applications	<a href="http://www2.kobe-u.ac.jp/~hsato/research_E.html">http://www2.kobe-u.ac.jp/~hsato/research_E.html</a>
17		Tominaga	Applications	<a href="http://www2.kobe-u.ac.jp/~tominaga/index_e.html">http://www2.kobe-u.ac.jp/~tominaga/index_e.html</a>
18	Shinshu University	Optical Physics	Devices	<a href="http://science.shinshu-u.ac.jp/~thz/index.html">http://science.shinshu-u.ac.jp/~thz/index.html</a>
19	Osaka City University	Wave Physics Engineering	Systems	<a href="http://www.a-phys.eng.osaka-cu.ac.jp/hosodag/index.html">http://www.a-phys.eng.osaka-cu.ac.jp/hosodag/index.html</a>



TT	Trường Đại học/ Viện nghiên cứu	Lab	Lĩnh vực	Đường link
20	The University of Tokyo	Shimano	Applications	<a href="http://thz.phys.s.u-tokyo.ac.jp/index_en.html">http://thz.phys.s.u-tokyo.ac.jp/index_en.html</a>
21		Hirakawa	Devices	<a href="https://thz.iis.u-tokyo.ac.jp/en/">https://thz.iis.u-tokyo.ac.jp/en/</a>
22	Tokyo University of Agriculture and Technology	Suzuki	Devices	<a href="http://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/index-e.html">http://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/index-e.html</a>
23		Zhang	Devices	<a href="http://web.tuat.ac.jp/~zhang/indexe.html">http://web.tuat.ac.jp/~zhang/indexe.html</a>
24	Okayama University	Advanced Electro Measurement Technology	Systems	<a href="https://www.ec.okayama-u.ac.jp/~sense/index.html">https://www.ec.okayama-u.ac.jp/~sense/index.html</a>
25	Waseda University	Kawanishi	Systems	<a href="http://www.f.waseda.jp/kawanishi/index-e.html">http://www.f.waseda.jp/kawanishi/index-e.html</a>

**Bảng 5.** Danh sách các công ty tiêu biểu

TT	Công ty	Đơn vị	Lĩnh vực	Đường link
1	NTT Laboratories	Device and technology laboratories	Devices & systems	<a href="https://www.ntt.co.jp/dtl/e/">https://www.ntt.co.jp/dtl/e/</a>
2	NICT	Frontier research laboratory	Devices & systems	<a href="http://www.nict.go.jp/frontier/">http://www.nict.go.jp/frontier/</a>
3		Terahertz technology research center	Devices & systems	<a href="https://www2.nict.go.jp/ttrc/">https://www2.nict.go.jp/ttrc/</a>
4	RIKEN	Center for advanced photonics	Devices & systems	<a href="https://rap.riken.jp/en/labs-list/">https://rap.riken.jp/en/labs-list/</a>
5		Photon engineering research center	Devices & systems	<a href="https://www.riken.jp/research/labs/rap/index.html">https://www.riken.jp/research/labs/rap/index.html</a>
6	Rohm	R&D	Devices	<a href="https://www.rohm.com/r-and-d/coretechnologies">https://www.rohm.com/r-and-d/coretechnologies</a>
7	QST	Advanced photon research	Systems	<a href="https://www.qst.go.jp/site/kansai-adprenglish/2879.html">https://www.qst.go.jp/site/kansai-adprenglish/2879.html</a>
8	Hamamatsu	Central research laboratory	Devices	<a href="https://www.hamamatsu.com/jp/ja/our-company/business-domain/central-research-laboratory/index.html">https://www.hamamatsu.com/jp/ja/our-company/business-domain/central-research-laboratory/index.html</a>
9	Advantest	Terahertz system	Systems	<a href="https://www.advantest.com/ja/products/terahertz-spectroscopic-imaging-systems">https://www.advantest.com/ja/products/terahertz-spectroscopic-imaging-systems</a>
10	Fujitsu Laboratories	Security laboratory	Devices & systems	<a href="https://www.fujitsu.com/jp/group/labs/business/">https://www.fujitsu.com/jp/group/labs/business/</a>
11	Furukawa Electric	R&D	Devices & systems	<a href="https://www.furukawa.co.jp/en/rd/profile/">https://www.furukawa.co.jp/en/rd/profile/</a>
12	SpectraDesign	R&D and commercial	Systems	<a href="http://www.spectra-dsn.co.jp/english/teraherts.html">http://www.spectra-dsn.co.jp/english/teraherts.html</a>

#### 4. Lời kết

Bài viết này giới thiệu sơ lược về sóng THz, một dải tần nằm giữa sóng radio và ánh sáng, sở hữu những đặc tính độc đáo. Trải qua nhiều thập niên nghiên cứu và phát triển cùng với những đột phá trong các công nghệ vật liệu, điện tử, và quang tử, những ứng dụng tiềm năng của sóng THz không còn dừng lại trên mặt giấy. Theo ý kiến của tác giả, trong tương lai gần sóng THz sẽ có những đóng góp nổi bật trong ứng dụng truyền thông thế hệ mới, nơi mà không chỉ có sự phát

triển vượt bậc về tốc độ truyền tải dữ liệu mà có cả sự thay đổi cả về khái niệm và phương thức truyền, cũng như trong ứng dụng kiểm định không phá hủy trong ngành nông nghiệp, công nghiệp, an ninh, và life science. Các nhà nghiên cứu, kỹ sư, chuyên gia, sinh viên Việt Nam làm việc trong các lĩnh vực trên có thể bắt đầu tìm hiểu về công nghệ này, biết đâu sẽ có những ý tưởng đột phá thúc đẩy sự phát triển của đất nước và thế giới.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Christian A. Herter Jr., “The electromagnetic spectrum: a critical natural resource”, *Nat. Resources J.*, vol. 25, 651, 1985.
- [2] Charles R. Burrows, “The history of radio wave propagation up to the end of World War I”, *Proceedings of the IRE*, vol. 50, pp. 682–684, 1962.
- [3] A. Rogalski, “History of infrared detectors”, *Opto-Electron. Rev.*, vol. 20, pp. 279–308, 2012.
- [4] A. Hessenbruch, “A brief history of x-rays”, *Endeavour*, vol. 26, pp. 137–141, 2002.
- [5] H. Rubens and E. F. Nichols, “Heat rays of great wave length”, *Phys. Rev.*, vol. 4, 314, 1897.
- [6] E. F. Nichols and J. D. Tear, “Joining the infra-red and electric wave spectra”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 9, pp. 211–214, 1923.
- [7] J. M. Chamberlain, “Where optics meets electronics: recent progress in decreasing the terahertz gap”, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, vol. 362, pp. 199–213, 2004.
- [8] “Terahertz (THz) technology: an introduction and research update”, *High Frequency Electronics Copyright © 2008 Summit Technical Media, LLC*, 2008.
- [9] F. F. Sizov, “Brief history of THz and IR technologies”, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 22, pp. 67–79, 2019.
- [10] A. Y. Pawar, D. D. Sonawane, K. B. Erande, and D. V. Derle, “Terahertz technology and its applications”, *Drug Invention Today*, vol. 5, pp. 157–163, 2013.
- [11] T. Nagatsuma, G. Ducournau, and C. Renaud, “Advances in terahertz communications accelerated by photonics”, *Nature Photon.*, vol. 10, pp. 371–379, 2016.
- [12] T. Nagatsuma, “Terahertz technologies: present and future”, *IEICE Electron. Express*, vol. 8, pp. 1127–1142, 2011.
- [13] D. M. Mittleman, “Perspective: Terahertz science and technology”, *J. Appl. Phys.*, vol. 122, 230901, 2017.
- [14] M. Naftaly, N. Vieweg, A. Deninger, “Industrial applications of terahertz sensing: state of play”, *Sensors*, vol. 19, 4203, 2019.
- [15] Top 50 Emerging Technologies: Growth Opportunities of Strategic Imperative. Online: [https://www3.frost.com/files/6014/7973/5474/Top\\_50\\_Emerging\\_Technologies.pdf](https://www3.frost.com/files/6014/7973/5474/Top_50_Emerging_Technologies.pdf)
- [16] J. Hebling, K.-L. Yeh, M. C. Hoffmann, B. Bartal, and K. A. Nelson, “Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities”, *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 25, B6, 2008.
- [17] J. Dai, J. Liu, and X.-C. Zhang, “Terahertz wave air photonics: terahertz wave generation and detection with laser-induced gas plasma”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 17, pp. 183–190, 2011.
- [18] S. Preu, G. H. Döhler, S. Malzer, L. J. Wang, and A. C. Gossard, “Tunable, continuous-wave Terahertz photomixer sources and applications”, *J. Appl. Phys.*, vol. 109, 061301, 2011.
- [19] G. A. Mourou and K. E. Meyer, “Subpicosecond electro-optic sampling using coplanar strip transmission lines”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, 492, 1984.
- [20] P. R. Smith, D. H. Auston, and M. C. Nuss, “Subpicosecond photoconducting dipole antennas”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, pp. 255–260, 1988.
- [21] B. S. Williams, “Terahertz quantum-cascade lasers”, *Nat. Photonics*, vol. 1, pp. 517–525, 2007.
- [22] A. Maestrini, “Frequency multipliers for local oscillators at THz frequency”, *4<sup>th</sup> ESA Workshop Millimetre Wave Technol. Applications*, Finland, Espoo, 2006.
- [23] Virginia Diode, Inc., <https://www.vadiodes.com/en/>.
- [24] M. Marso, “GaN for THz sources”, *8<sup>th</sup> International Conference on Advanced Semiconductor Device & Microsystem*, pp. 147–154, 2010.
- [25] M. Asada and S. Suzuki, “Room-temperature terahertz oscillation of electron devices”, *J. Institute of Electrical Engineers of Japan*, vol. 131-A, pp. 21–25, 2011.
- [26] K. Kasagi, S. Suzuki, and M. Asada, “Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1 THz”, *J. Appl. Phys.*, vol. 125, 151601, 2019.
- [27] M. Shur, “Si, SiGe, InP, III-N, and p-diamond FETs and HBTs for sub-terahertz and terahertz applications”, *Proc. SPIE 11279, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XIII*, 1127903, 2020.
- [28] W. C. B. Peatman and T. W. Crowe, “Design and fabrication of 0.5 micron GaAs Schottky barrier diodes for low-noise terahertz receiver applications”, *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, vol. 11, pp. 355–365, 1990.
- [29] A. Maestrini, B. Thomas, H. Wang, C. Jung, J. Treuttel, Y. Jin, G. Chattopadhyay, I. Mehdi, and G. Beaudin, “Schottky diode-based terahertz frequency multipliers and mixers”, *Comptes Rendus Physique*, vol. 11, pp. 480–495, 2010.
- [30] S. Komiyama, “Single-Photon detectors in the Terahertz range”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 17, pp. 54–66, 2011.
- [31] Q. Wu and X.-C. Zhang, “Free-space electro-optic sampling of terahertz beams”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, 3523, 1995.
- [32] S. Han, H. Ko, N. Kim, H. Ryu, C. Wook Lee, Y. Ahn Leem, D. Lee, M. Yong Jeon, S. Kyu Noh, H. Sook Chun, and K. Hyun Park, “Optical fiber-

- coupled InGaAs-based terahertz time-domain spectroscopy system”, *Opt. Lett.*, vol. 36, pp. 3094–3096, 2011.
- [33] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, “Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond”, *invited paper IEEE Access*, vol. 76, pp. 78729–78757, 2019.
- [34] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair and M. Alouini, “Terahertz band: the last piece of RF spectrum puzzle for communication systems”, *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 1–32, 2020.
- [35] E. Pickwell and V. P. Wallace, “Biomedical applications of terahertz technology”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 39, pp. R301–R310, 2006.
- [36] ITU, the United Nations, <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>.
- [37] F. Qamar, M.U.A. Siddiqui, M.N. Hindia, R. Hassan, and Q.N. Nguyen, “Issues, challenges, and research trends in spectrum management: a comprehensive overview and new vision for designing 6G networks”, *Electronics*, vol. 9, 1416, 2020.
- [38] H. Mehta, D. Patel, B. Joshi, and H. Modi, “0G to 5G mobile technology: a survey”, *J. of Basic and Applied Engineering Research*, vol. 1, pp. 56–60, 2014.
- [39] A. U. Gawas, “An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G”, *Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun.*, vol. 3, pp. 3130–3133, 2015.
- [40] N. Al-Falahy and O. Y. Alani, “Technologies for 5G networks: challenges and opportunities”, *IT Prof.*, vol. 19, pp. 12–20, 2017.
- [41] O. T. Eluwole, N. Udoh, M. Ojo, C. Okoro, and A. J. Akinyoade, “From 1G to 5G, what next?”, *IAENG Int. J. Comput. Sci.*, vol. 45, pp. 413–434, 2018.
- [42] Wi-Fi IEEE 802.11, <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/channels-frequencies-bands-bandwidth.php>.
- [43] C. J. Hansen, “WiGig: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band”, *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 18, pp. 6–7, 2011.
- [44] S. Alfattani, “Review of LiFi Technology and Its Future Applications”, *J. Opt. Commun.*, 2011.
- [45] H. Haas and T. Cogalan, “LiFi opportunities and challenges”, *16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 361–366, 2019.
- [46] J. N. Murdock and T. S. Rappaport, “Consumption factor: A figure of merit for power consumption and energy efficiency in broadband wireless communications”, *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM) Workshops*, pp. 1393–1398, 2011.
- [47] J. N. Murdock and T. S. Rappaport, “Consumption factor and power efficiency factor: A theory for evaluating the energy efficiency of cascaded communication systems”, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, pp. 221–236, 2014.
- [48] H. Shams, T. Shao, M. J. Fice, P. M. Anandarajah, C. C. Renaud, F. Van Dijk, Liam P. Barry, and Alwyn J. Seeds, “100 Gb/s multicarrier THz wireless transmission system with high frequency stability based on a gain-switched laser comb source”, *IEEE Photon. J.*, vol. 7, pp. 1–11, 2015.
- [49] V. K. Chinni, P. Latzel, M. Zegaoui, C. Coinon, X. Wallart, E. Peytavit, J. F. Lampin, K. Engehardt, P. Szriftgiser, M. Zaknoune, and G. Ducournau, “Single-channel 100 Gbit/s transmission using III–V UTC-PDs for future IEEE 802.15.3d wireless links in the 300 GHz band”, *Electron. Lett.*, vol. 54, pp. 638–640, 2018.
- [50] T. Nagatsuma, K. Oogimoto, Y. Yasuda, Y. Fujita, Y. Inubushi, S. Hisatake, A. M. Agoues, and G. C. Lopez, “300-GHz-band wireless transmission at 50 Gbit/s over 100 meters”, *Tech. Dig. International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016)*, F2D.2, 2016.
- [51] X. Pang, “260 Gbit/s photonic-wireless link in the THz band”, *Proc. IEEE Photonics Conf.*, 2016.
- [52] T. Nagatsuma, T. Kurokawa, M. Sonoda, T. Ishibashi, M. Shimizu and K. Kato, “600-GHz-band waveguide-output uni-traveling-carrier photodiodes and their applications to wireless communication”, *Tech. Dig. IEEE Intern. Microwave Symposium (IMS 2018)*, pp. 1180–1183, 2018.
- [53] M. Fujishima, S. Amakawa, K. Takano, K. Katayama, and T. Yoshida, “Terahertz CMOS design for low-power and high-speed wireless communication”, *IEICE Trans. Electron.*, vol. E98-C, pp. 1091–1104, 2015.
- [54] F. Boes, T. Messinger, J. Antes, D. Meier, A. Tessmann, A. Inam, and I. Kallfass, “Ultra-broadband MMIC-based wireless link at 240 GHz enabled by 64 GS/s DAC”, *Proc. 39th Int. Conf. Infrared Millimeter Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, pp. 1–2, 2014.
- [55] H. Hamada, T. Fujimura, I. Abdo, K. Okada, H. Song, H. Sugiyama, H. Matsuzaki, and H. Nosaka, “300-GHz. 100-Gb/s InP-HEMT wireless transceiver using a 300-GHz fundamental mixer”, *Tech. Dig. IEEE Intern. Microwave Symposium (IMS 2018)*, pp. 1480–1483, 2018.
- [56] N. Oshima, K. Hashimoto, S. Suzuki and M. Asada, “Wireless data transmission of 34 Gbit/s at a 500-GHz range using resonant-tunnelling-diode terahertz oscillator”, *Electron. Lett.*, vol. 52, pp. 1897–1898, 2016.



- [57] D. M. Mittleman, “Twenty years of terahertz imaging”, *Opt. Express*, vol. 26, 9417, 2018.
- [58] B. B. Hu and M. C. Nuss, “Imaging with terahertz waves”, *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1716–1719, 1995.
- [59] M. Tonouchi, “Cutting-edge terahertz technology”, *Nat. Photonics*, vol. 1, pp. 97–105, 2007.
- [60] P. U. Jepsen, D. G. Cooke, and M. Koch, “Terahertz spectroscopy and imaging – modern techniques and applications”, *Laser Photon. Rev.*, vol. 5, pp. 124–166, 2011.
- [61] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, “Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints”, *Opt. Express*, vol. 11, pp. 2549–2554, 2003.
- [62] Y. C. Shen, T. Lo, P. F. Taday, B. E. Cole, W. R. Tribe, and M. C. Kemp, “Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, 241116, 2005.
- [63] A. G. Davies, A. D. Burnett, W. Fan, E. H. Linfield, and J. E. Cunningham, “Terahertz spectroscopy of explosives and drugs”, *Mater. Today*, vol. 11, pp. 18–26, 2008.
- [64] H. Hoshina, Y. Sasaki, A. Hayashi, C. Otani, and K. Kawase, “Noninvasive mail inspection system with Terahertz radiation”, *Appl. Spectrosc.*, vol. 63, pp. 81–86, 2009.
- [65] H. B. Liu, Y. Chen, G. J. Bastiaans, X. C. Zhang, “Detection and identification of explosive RDX by THz diffuse reflection spectroscopy”, *Opt. Express*, vol. 14, pp. 415–423, 2006.
- [66] C. H. Feng and C. Otani, “Terahertz spectroscopy technology as an innovative technique for food: current state-of-the-art research advances”, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, pp. 1–21, 2020.
- [67] S. K. Mathanker, P. R. Weckler and N. Wang, “Terahertz (THz) applications in food and agriculture: a review”, *Trans. ASABE*, vol. 56, pp. 1213–1226, 2013.
- [68] C. Jordens and M. Koch, “Detection of foreign bodies in chocolate with pulsed terahertz spectroscopy”, *Opt. Eng.*, vol. 47, 037003, 2008.
- [69] M. Herrmann, M. Tani, M. Watanabe and K. Sakai, “Terahertz imaging of objects in powders”, *IEEE Proc. Optoelectron.*, vol. 149, pp. 116–120, 2002.
- [70] H. Zhan, J. Xi, K. Zhao, R. Bao, and L. Xiao, “A spectral-mathematical strategy for the identification of edible and swill-cooked dirty oils using terahertz spectroscopy”, *Food Control*, vol. 67, pp. 114–118, 2016.
- [71] I. Maeng, S. H. Baek, H. Y. Kim, G. S. Ok, S. W. Choi, and H. S. Chun, “Feasibility of using Terahertz spectroscopy to detect seven different pesticides in wheat flour”, *J. Food Protect.*, vol. 77, pp. 2081–2087, 2014.
- [72] J. J. Liu and J. Q. Kan, “Recognition of genetically modified product based on affinity propagation clustering and terahertz spectroscopy”, *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 194, pp. 14–20, 2018.
- [73] R. Wilk, F. Breitzfeld, M. Mikulics, and M. Koch, “Continuous wave terahertz spectrometer as a noncontact thickness measuring device”, *Appl. Opt.*, vol. 47, pp. 14–20, 2008.
- [74] D. Banerjee, W. V. Spiegel, M. D. Thomson, S. Schabel, and H. G. Roskos, “Diagnosing water content in paper by terahertz radiation”, *Opt. Express*, vol. 16, pp. 9060–9066, 2008.
- [75] P. Mousavi, F. Haran, D. Jez, F. Santosa, and J. S. Dodge, “Simultaneous composition and thickness measurement of paper using terahertz time-domain spectroscopy”, *Appl. Opt.*, vol. 48, pp. 6541–6546, 2009.
- [76] S. Wietzke, C. Jansen, F. Rutz, D. M. Mittleman, and M. Koch, “Determination of additive content in polymeric compounds with terahertz time-domain spectroscopy”, *Polym. Testing*, vol. 26, pp. 614–618, 2007.
- [77] N. Krumbholz, T. Hochrein, N. Vieweg, T. Hasek, K. Kretschmer, M. Bastian, M. Mikulics, and M. Koch, “Monitoring polymeric compounding processes inline with THz time-domain spectroscopy”, *Polym. Testing*, vol. 28, pp. 30–35, 2009.
- [78] C. Jordens, S. Wietzke, M. Scheller, and M. Koch, “Investigation of the water absorption in polyamide and wood plastic composite by terahertz time-domain spectroscopy”, *Polym. Testing*, vol. 29, pp. 209–215, 2010.
- [79] S. Wietzke, C. Jordens, N. Krumbholz, M. Koch, B. Baudrit, and M. Bastian, “Terahertz imaging: a new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints”, *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Public*, vol. 2, 07013, 2007.
- [80] C. Jansen, S. Wietzke, O. Peters, M. Scheller, N. Vieweg, M. Salhi, N. Krumbholz, C. Jordens, T. Hochrein, and M. Koch, “Terahertz imaging: applications and perspectives”, *Appl. Opt.*, vol. 49, pp. E48–E57, 2010.
- [81] S. Nashima, O. Morikawa, K. Takata, and M. Hangyo, “Temperature dependence of optical and electronic properties of moderately doped silicon at terahertz frequencies”, *J. Appl. Phys.*, vol. 90, pp. 837–842, 2001.
- [82] D. M. Mittleman, J. Cunningham, M. C. Nuss, and M. Geva, “Noncontact semiconductor wafer characterization with the Hall effect”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, pp. 16–18, 1997.
- [83] M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, K. Nikawa, and M. Tonouchi, “Inspection of semiconductor devices without bias voltage using a Laser-THz Emission Microscope”, *Conf. Optical Terahertz Science and Technology*, TuC4, 2005.

- [84] M. Herrmann, M. Tani, K. Sakai, and R. Fukasawa, “Terahertz imaging of silicon wafers”, *J. Appl. Phys.*, vol. 91, pp. 1247–1250, 2002.
- [85] E. Abraham, A. Younus, J. C. Delagnes, and P. Mounaix, “Non-invasive investigation of art paintings by terahertz imaging”, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 100, pp. 585–590, 2010.
- [86] C. L. Koch-Dandolo, T. Filtenborg, K. Fukunaga, J. Skou-Hansen, and P. U. Jepsen, “Reflection terahertz timedomain imaging for analysis of an 18th century neoclassical easel painting”, *Appl. Opt.*, vol. 54, pp. 5123–5129, 2015.
- [87] A. Younus, S. Salort, B. Chassagne, B. Recur, A. Ziéglé, A. Dautant, and E. Abraham, “Terahertz tomographic imaging of XVIIIth Dynasty Egyptian sealed pottery”, *Appl. Opt.*, vol. 50, pp. 3604–3608, 2011.
- [88] C. L. Koch Dandolo and P. U. Jepsen, “Wall painting investigation by means of non-invasive terahertz timedomain imaging (THz-TDI): Inspection of subsurface structures buried in historical plasters”, *J. Infrared Millim. THz Waves*, vol. 37, pp. 198–208, 2016.
- [89] H. Murakami, K. Serita, Y. Maekawa, S. Fujiwara, E. Matsuda, S. Kim, I. Kawayama, and M. Tonouchi, “Scanning laser THz imaging system”, *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 47, 374007, 2014.
- [90] M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, T. Kiwa, and M. Tonouchi, “Imaging of large-scale integrated circuits using laser-terahertz emission microscopy”, *Opt. Express*, vol. 13, pp. 115–120, 2005.
- [91] H. Nakanishi, A. Ito, K. Takayama, I. Kawayama, H. Murakami, and M. Tonouchi, “Comparison between laser terahertz emission microscope and conventional methods for analysis of polycrystalline silicon solar cell”, *AIP Adv.*, vol. 5, 117129, 2015.
- [92] T. L. Cocker, V. Jelic, M. Gupta, S. J. Molesky, J. A. J. Burgess, G. D. L. Reyes, L. V. Titova, Y. Y. Tsui, M. R. Freeman, and F. A. Hegmann, “An ultrafast terahertz scanning tunneling microscope”, *Nat. Photonics*, vol. 7, pp. 620–625, 2013.
- [93] K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, and J. Takeda, “Real-space coherent manipulation of electrons in a single tunnel junction by single-cycle terahertz electric field”, *Nat. Photonics*, vol. 10, pp. 762–765, 2016.
- [94] V. Jelic, K. Iwaszczuk, P. H. Nguyen, C. Rathje, G. J. Hornig, H. M. Sharum, J. R. Hoffman, M. R. Freeman, and F. A. Hegmann, “Ultrafast terahertz control of extreme tunnel currents through single atoms on a silicon surface”, *Nat. Photonics*, vol. 13, pp. 591–598, 2017.
- [95] V. P. Wallace, A. J. Fitzgerald, S. Shankar, N. Flanagan, R. J. Pye, J. Cluff, and D. D. Arnone, “Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma ex vivo and in vivo”, *B. J. Derm.*, vol. 151, pp. 424–432, 2004.
- [96] A. J. Fitzgerald, V. P. Wallace, M. Jimenez-Linan, L. Bobrow, R. J. Pye, A. D. Purushotham, and D. D. Arnone, “Terahertz pulsed imaging of human breast tumors”, *Radiology*, vol. 239, pp. 533–540, 2006.
- [97] P. C. Ashworth, E. Pickwell-MacPherson, E. Provenzano, S. E. Pinder, A. D. Purushotham, M. Pepper, and V. P. Wallace, “Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer”, *Opt. Exp.*, vol. 17, pp. 12444–12454, 2009.
- [98] Z. D. Taylor, R. S. Singh, D. B. Bennett, P. Tewari, C. P. Kealey, N. Bajwa, M. O. Culjat, A. Stojadinovic, H. Lee, J. -P. Hubschman, E. R. Brown, and W. S. Grundfest, “THz medical imaging: in vivo hydration sensing”, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 1, pp. 201–219, 2011.
- [99] D. B. Bennett, Z. D. Taylor, D. Sassoon, P. Tewari, R. D. Johnson, R. Singh, M. O. Culjat, J. -P. Hubschman, and W. S. Grundfest, “Terahertz sensing in corneal tissues”, *J. Biomed. Opt.*, vol. 16, 057003, 2011. [97] D. B. Bennett, Z. D. Taylor, D. Sassoon, P. Tewari, R. D. Johnson, R. Singh, M. O. Culjat, J. -P. Hubschman, and W. S. Grundfest, “Terahertz sensing in corneal tissues”, *J. Biomed. Opt.*, vol. 16, 057003, 2011.
- [100] Y. Ji, S. Oh, S.-G. Kang, J. Heo, S.-H. Kim, Y. Choi, S. Song, H. Son, S. Kim, J. Lee, S. Haam, Y. Huh, J. Chang, C. Joo, and J.-S. Suh, “Terahertz reflectometry imaging for low and high grade gliomas”, *Sci. Rep.*, vol. 6, 36040, 2016.
- [101] P. F. Taday, “Applications of terahertz spectroscopy to pharmaceutical sciences”, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, vol. 362, pp. 351–364, 2003.
- [102] Y. -C. Shen, “Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: a review”, *Int. J. Pharm.*, vol. 417, pp. 48–60, 2011.
- [103] K. Ajito, “Terahertz spectroscopy for pharmaceutical and biomedical applications”, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 5, pp. 1140–1145, 2015.
- [104] D. M. Charron, K. Ajito, J.-Y. Kim, and Y. Ueno, “Chemical mapping of pharmaceutical cocrystals using terahertz spectroscopic imaging”, *Anal. Chem.*, vol. 85, pp. 1980–1984, 2013.
- [105] N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K. -I Lin, J. -S. Hwang, J. Xu, and X. -C. Zhang, “Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, 054105, 2005.
- [106] J. C. Dickinson, T. M. Goyette, A. J. Gatesman, C. S. Joseph, Z. G. Root, R. H. Giles, J. Waldman, and W. E. Nixon, “Terahertz imaging of subjects with concealed weapons”, *Proc. SPIE*, vol. 6212, 62120Q, 2006.

- [107] L. E. Marchese, M. Terroux, D. Dufour, M. Bolduc, C. Chevalier, F. Génèreux, H. Jerominek, and A. Bergeron, “Case study of concealed weapons detection at stand-off distances using a compact large field-of-view THz camera”, *Proc. SPIE*, vol. 9083, 90832G, 2014.
- [108] D. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss, “T-ray imaging”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 2, pp. 679–692, 1996.
- [109] D. Zimdars, J. S. White, G. Stuk, A. Chernovsky, G. Fichter and S. Williamson, “Large area terahertz imaging and non-destructive evaluation applications”, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 48, pp. 537–539, 2006.
- [110] S. S. Dhillon et al., “The 2017 terahertz science and technology roadmap”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 50, 043001, 2017.
- [111] O. Mitrofanov, L. Viti, E. Dardanis, M. C. Giordano, D. Ercolani, A. Politano, L. Sorba, and M. S. Vitiello, “Near-field terahertz probes with room-temperature nanodetectors for subwavelength resolution imaging”, *Sci. Rep.*, vol. 7, 44240, 2017.
- [112] S. -C. Chen, L. -H. Du, K. Meng, J. Li, Z. -H. Zhai, Q. -W. Shi, Z. -R. Li, and L. -G. Zhu, “Terahertz wave near-field compressive imaging with a spatial resolution of over  $\lambda/100$ ”, *Opt. Lett.*, vol. 44, pp. 21–24, 2019.
- [118] E. Ojefors, U. R. Pfeiffer, A. Lisauskas, and H. G. Roskos, “A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process technology”, *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 44, pp. 1968–1976, 2009.
- [119] M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, “Single-pixel imaging via compressive sampling”, *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25, pp. 83–91, 2008.
- [113] N. Chernomyrdin, A. Kucheryavenko, G. Kolontaeva, G. Katyba, I. Dolganova, P. Karalkin, D. Ponomarev, V. Kurlov, I. Reshetov, M. Skorobogatiy, V. Tuchin, K. Zaytsev, “Reflection-mode continuous-wave  $0.15\lambda$ -resolution terahertz solid immersion microscopy of soft biological tissues”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 113, 111102, 2018.
- [114] H. H. Nguyen Pham, S. Hisatake, O. V. Minin, T. Nagatsuma, and I. V. Minin, “Enhancement of spatial resolution of terahertz imaging systems based on terajet generation by dielectric cube”, *APL Photonics*, vol. 2, 056106, 2017.
- [115] K. Ahi and M. Anwar, “Developing terahertz imaging equation and enhancement of the resolution of terahertz images using deconvolution”, *Proc. SPIE*, vol. 9856, 98560N, 2016.
- [116] J. Dong, A. Locquet and D. S. Citrin, “Depth resolution enhancement of terahertz deconvolution by autoregressive spectral extrapolation”, *Opt. Lett.*, vol. 42, pp. 1828–1831, 2017.
- [117] J. J. Lynch, P. A. Macdonald, H. P. Moyer, and R. G. Nagele, “Passive millimeter wave imaging sensors for commercial markets”, *Appl. Opt.*, vol. 49, pp. E7–E12, 2010.
- [120] C. M. Watts, D. Shrekenhamer, J. Montoya, G. Lipworth, J. Hunt, T. Sleasman, S. Krishna, D. R. Smith, and W. J. Padilla, “Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators”, *Nat. Photonics*, vol. 8, pp. 605–609, 2014.
- [121] E. Heinz, T. May, D. Born, G. Zieger, S. Anders, V. Zakosarenko, H. -G. Meyer, and C. Schaffel, “Passive 350 GHz video imaging systems for security applications”, *J. Infr. Millim. THz. Waves*, vol. 36, pp. 879–895, 2015.