

## TECNICHE FOTONICHE PER LA GENERAZIONE E RIVELAZIONE DI ONDE MILLIMETRICHE E LORO APPLICAZIONI

Tiziana Tambosso, Telecom Italia Lab, Torino  
Silvano Donati, Dipartimento di Elettronica, Università di Pavia, Pavia

*In this paper a review of the recently developed photonic techniques for the generation (photomixing, active and passive mode-locking) and detection of millimetre waves is presented; the results are compared with the ones obtained by conventional electronic techniques.*

*We will then report on the main applications of mm-waves in the areas of communications (mm-wave WLAN, Radio over Fibre, 4G Mobile Broadband Systems). Also a short mention will be made to applications to radio-astronomy (mm-waves detectors) and to bio-engineering (Terahertz Imaging).*

### 1. Introduzione

Recentemente si è assistito, nella letteratura scientifica, ad un notevole aumento d'attività nel settore della *microwave photonics*. Fino a qualche anno fa, nonostante la nascita di nuove riviste scientifiche che coniugavano i termini ottica (o fotonica) e microonde, sostanzialmente non si registrava nulla di nuovo tecnicamente, al di là della corsa a sempre più alte frequenze, sino appunto al campo delle microonde, trattate o trasmesse dai sistemi fotonici.

Vi sono stati però almeno due *breakthrough* molto significativi, che hanno in comune il superamento della tecnica tradizionale puramente elettronica mediante l'apporto determinante della tecnica fotonica.

I due esempi, che si commenteranno brevemente, sono: il fotodiodo con preamplificatore ottico integrato, e la generazione di segnali ad onde millimetriche per fotomescolamento (o photomixing).

Il primo esempio [1,2] consiste nell'integrazione, sullo stesso substrato a semiconduttore, del fotorivelatore e del preamplificatore ottico.

Questa possibilità non era certo una nuova idea, trovandosi descritta anche in libri di testo [3], tuttavia l'importanza scientifica sta nel fatto che si supera per la prima volta, nei sistemi a 40 Gb/s, la soluzione puramente elettronica dell'amplificatore a transimpedenza (front-end), sostituendolo con un preamplificatore ottico e ottenendo un miglior risultato di rumore [3]. Inoltre, se pensiamo che l'evoluzione della frequenza di cifra non sia finita, e che dopo i 40Gb/s arriveranno i 160Gb/s (se ne parla già, sia pure a livello di valutazione delle potenzialità [4]), appare chiaro che la soluzione tecnica per il ricevitore incorporerà certamente l'approccio oggi nuovo del preamplificatore ottico integrato col fotodiodo.

Questa soluzione infatti è tecnicamente superiore a quelle tradizionali, basate come ben noto su meccanismi di guadagno interno (fotodiodo a valanga o APD) abbinati al preamplificatore di transimpedenza. Al crescere della frequenza di cifra, il fotorivelatore richiede una resistenza di terminazione sempre più piccola, come carico dell'amplificatore a transimpedenza, per mantenere la banda (sia pure con un recupero dovuto alla riduzione della capacità di giunzione per effetto della diminuzione dell'area del fotodiodo). Tuttavia, si arriva ai valori d'impedenza caratteristica ( $\approx 50$  ohm) delle linee di trasmissione e quindi l'amplificatore a transimpedenza perde di significato. Inoltre, non si riesce a sfruttare la moltiplicazione a valanga, non essendo disponibile un semiconduttore (sia ordinario che ad ingegneria del bandgap) con un elevato rapporto dei coefficienti di ionizzazione (per il guadagno) e un'elevata mobilità dei portatori (per la banda).

Nel diagramma di Fig.1 che riporta le prestazioni dei vari ricevitori, i dati di sensibilità per il fotorivelatore a preamplificazione ottica sono sensibilmente migliori dei valori per i tradizionali fotorivelatori con amplificatori a transimpedenza.

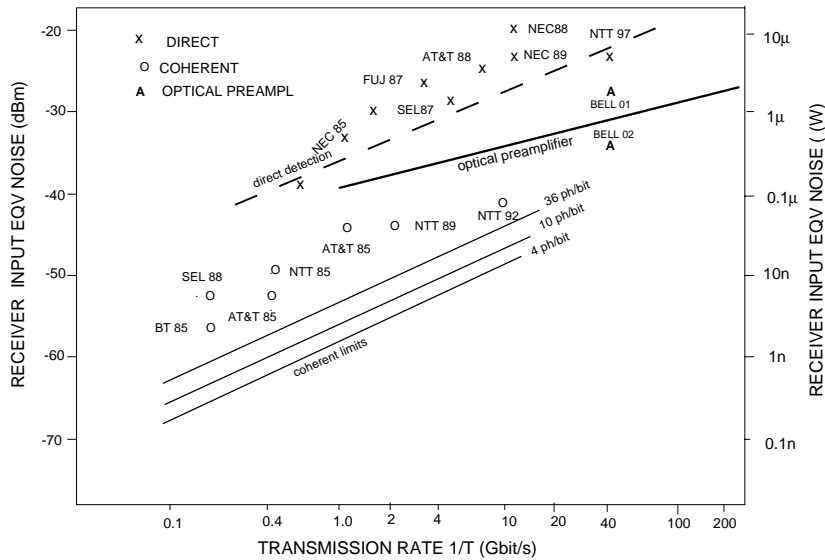


Figura 1 - Prestazioni dei ricevitori (rumore equivalente d'ingresso in funzione del tasso di trasmissione). I ricevitori con preamplificatore ottico a 40 Gb/s sono migliori di quelli a rivelazione diretta con front-end a transimpedenza (adattata da [3] con i dati di [1,2]).

Anche la struttura del dispositivo (Fig.2) è interessante: il fotodiodo è in guida ridge come la sezione amplificatore, e nello stesso materiale, buche quantiche multiple (MQW - Multi Quantum Well) in InGaAs su un substrato e con un *overcap* di InP. Poiché la sezione amplificatore ottico lavora in polarizzazione diretta e quella fotodiodo in inversa, è necessario interporre una regione d'isolamento (ottenuta con varie tecniche, di solito intermixing [5]). Il fotodiodo è abbastanza lungo da assorbire tutta la radiazione evitando così la retroriflessione nell'amplificatore da parte del bordo della tessera. Una regione di rastremazione serve a ridurre l'ellitticità del modo facilitando l'accoppiamento alla fibra d'ingresso.

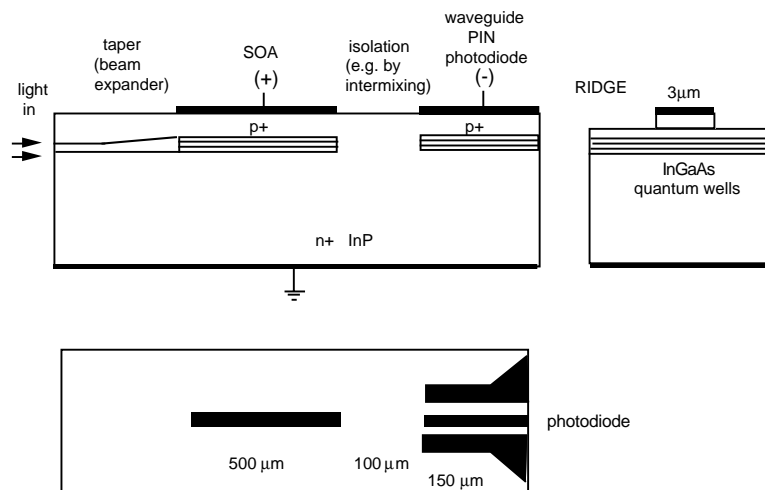


Figura 2 - Sezione e vista in pianta della tessera di ricevitore integrato che incorpora l'amplificatore ottico, con QW in InGaAs ( $\lambda=1550$  nm) e il fotodiodo con uscita in guida coplanare. Entrambi i componenti usano la stessa struttura di guida ottica. Per la separazione elettrica e ottica, è interposto uno strato d'isolamento. La guida d'ingresso è rastremata per una miglior efficienza (-3dB) d'accoppiamento alla fibra. Il guadagno dell'amplificatore, lungo 500µm, è 10-14 dB ad una corrente di 40-60 mA.

È interessante notare, nella struttura di Fig.2, che il fotodiodo da planare con ingresso verticale è diventato del tipo ad ingresso laterale. Questa struttura, nota sin dai primordi della

tecnica di fotorivelazione [3] e usata per mettere a disposizione un'elevata lunghezza di assorbimento, diventa essenziale alle iperfrequenze. Infatti, essa permette di separare la funzione di assorbimento dei fotoni da quella di deriva dei portatori fotogenerati: non si ha più dunque da soggiacere al compromesso tra efficienza di rivelazione e banda. Anzi, la lunghezza di assorbimento (o il parametro  $1/\alpha$ ) fissa una delle due dimensioni geometriche dell'area sensibile, l'altra essendo la larghezza del modo che si propaga, fortunatamente non molto più grande di  $\lambda$ , quando si usa all'uscita una fibra monomodale. Le cariche fotogenerate sono raccolte trasversalmente alla guida ottica, e perciò si può abbreviare il tragitto che esse devono percorrere (taglio intrinseco) e addirittura eliminare l'effetto della capacità di giunzione (taglio estrinseco), perché s'incorpora in una linea di trasmissione coplanare d'uscita per il segnale elettrico (Fig.2).

L'amplificatore a semiconduttore sconta di solito un'alta perdita d'inserzione (rispetto all'EDFA, ad esempio) nell'accoppiamento alla fibra ottica, poiché il modo spaziale dei semiconduttori, tutti ad alto indice di rifrazione ( $n=3.5$  tipico), è molto più piccolo del modo della fibra. Però, nel ricevitore integrato, il fotodiodo segue direttamente l'amplificatore, e una delle due perdite d'accoppiamento è eliminata.

L'altro significativo esempio di tecnica fotonica che si propone in alternativa ai tradizionali approcci elettronici è quello del *fotomescolamento* o *photomixing*.

Il fotomescolamento non è altro che la ben nota rivelazione coerente [3] che, quando si esegue con un fotodiodo ultrarapido sui due (o più) modi emessi da una sorgente laser, genera un segnale di battimento che può godere di proprietà inattese e particolarmente buone.

Una semplice configurazione per effettuare photomixing, anche con due laser a cavità Fabry-Perot è descritta in un'altra memoria presentata a questo convegno [6]. In questo caso e come normalmente accade, il segnale di battimento alla frequenza differenza tra i due modi (o relativi campi elettrici) che si inviano sul fotodiodo, fluttua parecchio in frequenza, e tutti gli sforzi sono indirizzati ad aggirare detta fluttuazione per riuscire ad avvalersi del battimento stesso.

Quando invece si parte da una coppia di modi molto ben definiti in frequenza, la larghezza di riga di partenza è quella che si trova nel battimento (al più peggiorata di  $\sqrt{2}$ ), ovvero nel segnale a frequenza elettrica erogato dal fotodiodo. Pertanto, se si usano due laser DFB o DBR [7,8] a riga stretta ( $\approx$ MHz) oppure stabilizzati in frequenza (si può scendere a  $\Delta f \approx 10$  kHz) si possono ottenere segnali a frequenza elevatissima, sino al massimo della risposta in frequenza del fotodiodo disponibile, e con la stessa  $\Delta f$  del laser utilizzato. Ovvero, si trasferisce dalla frequenza ottica a quella elettrica la stabilità in frequenza.

Questa circostanza è ben nota nel settore della radioastronomia, ove da tempo è attiva la collaborazione internazionale ALMA, che tra l'altro si occupa degli oscillatori locali per fotomescolamento (vedi [www.mma.nrao.edu/memos/html-memos](http://www.mma.nrao.edu/memos/html-memos), con circa 350 articoli).

Ci si potrebbe domandare perché (a livello concettuale) la stabilità in frequenza di sorgenti ottiche (oscillatori laser) dovrebbe essere nettamente migliore della stabilità in frequenza di sorgenti elettriche (oscillatori elettronici). La ragione esiste, e sta nella maggior selettività  $\Delta f/f = 1/Q$  dell'oscillatore a frequenze ottiche, banalmente perché il Q è proporzionale al numero di lunghezze d'onda contenute nelle dimensioni del (risuonatore) laser rispetto a quello di onde millimetriche o centimetriche.

In particolare, in un altro lavoro presentato a questo convegno [9], si dimostra che in un laser a semiconduttore in mode-locking passivo, che oscilla con numerosi modi longitudinali spaziatosi  $c/2nL$  ( $L$  = lunghezza cavità,  $c$  = velocità della luce,  $n$  = indice di rifrazione), la stabilità in frequenza è particolarmente buona ( $\approx 100$  kHz). Così, realizzando un laser lungo  $L = 2400 \dots 1200 \dots 800 \mu\text{m}$ , si ottiene una spaziatura  $c/2nL = 20 \dots 40 \dots 60$  GHz, cioè un'uscita dal fotodiodo che si posiziona nel campo delle onde millimetriche.

Si noti che una stabilità, ad es. di 100kHz a 60 GHz non è facile da ottenere con oscillatori a transistori (della appropriata  $f_T$ ), a meno di non ricorrere a complicate e costose tecniche di stabilizzazione in frequenza [10].

Perciò il *photomixing* diventa una promettente *tecnica fotonica* per la generazione di segnali e portanti a microonde.

Condizione per la riuscita della nuova tecnica è che si riesca a realizzare sorgenti laser di ragionevolmente alta potenza  $P_{ott}$  e che i fotodiodi siano in grado di convertire con alta efficienza quantica  $\eta$  il segnale ottico in elettrico.

Per fare un esempio, supponendo di collegare il fotodiodo mescolatore ad un carico  $R$ , si ottiene una potenza elettrica  $P_{el} = R I^2 = R[(\eta e/h\nu) P_{ott}]^2$ . Quando  $R(\eta e/h\nu)^2 P_{ott} = 1$ , si eguaglia la potenza ottica con l'elettrica. Tale condizione si scrive anche:  $P_{ott} = 1/R(\eta e/h\nu)^2$  e per ragionevoli valori (ad es.  $R = 50\Omega$ ,  $\eta e/h\nu = 1$  A/W) si ottiene  $P_0 = 1/50 = 20\text{mW}$ . Per  $P_{ott} > P_0$  la potenza elettrica è maggiore di quella ottica, di un fattore  $P_{ott}/P_0$ , e viceversa per  $P_{ott} < P_0$ .

Riguardo ai fotodiodi, strutture avanzate con uscita in guida oppure ad onda viaggiante, a singolo portatore (uni-traveling carrier) oppure MSM (con giunzione metallo-semiconduttore) hanno mostrato di raggiungere agevolmente 150 GHz [11, 12], con punte record di 500-600 GHz. Frequenze ancora più elevate sono raggiunte da fotoconduttori veloci, quali il LT-GaAs (low-temperature grown GaAs) e da cristalli non lineari (GaSe, ZnGeP<sub>2</sub>, ecc.) che sono in grado di erogare Watt a frequenze del THz [13, 14].

Uno sforzo di ricerca attualmente in corso riguardo ai fotodiodi è rivolto ad ottenere alte correnti di saturazione alle più alte bande di risposta [15], per l'uso nel campo di frequenza dei 60-90 GHz.

## 2. Applicazioni alle comunicazioni

La possibilità di disporre, per photomixing di un laser operante in mode-locking, di una potenza elettrica di qualche mW alle frequenze da qualche GHz a 100 GHz ed oltre, apre la strada a diverse applicazioni nel settore delle comunicazioni.

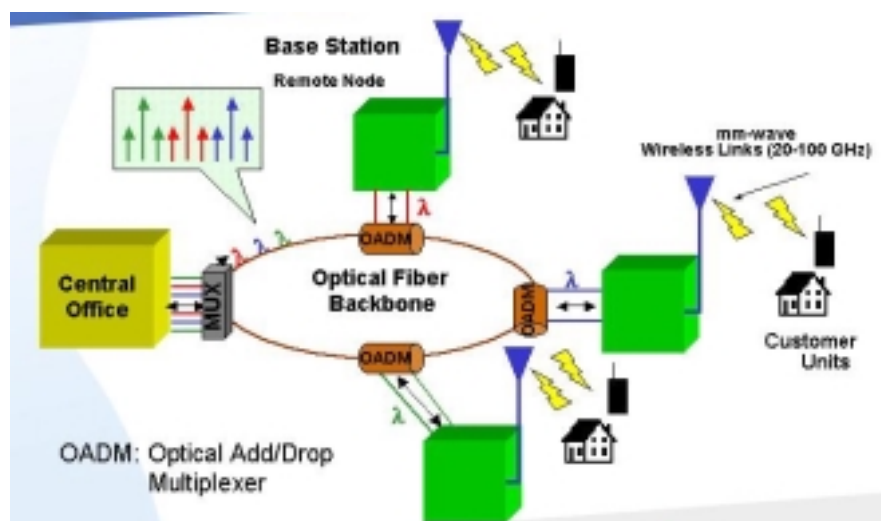


Figura 3 – Schema di rete Radio over Fibre, con collegamento radio ad onde millimetriche

Infatti, la banda attorno ai 60 GHz si sta affermando come la banda più adeguata per sistemi mobili a larga banda (MBS-Mobile Broadband Systems) e WLAN (Wireless LAN) per diversi motivi: l'ampia banda ( $\approx 5$  GHz) messa a disposizione, senza bisogno di licenza d'uso, dai principali Enti di standardizzazione mondiale (FCC-Federal Communications Commission in USA, ETSI-European Telecommunications Standards Institute in Europe, TTC-Telecommunication Technology Committee in Japan); l'elevata attenuazione di spazio libero (aumenta con il quadrato della frequenza) e l'assorbimento delle molecole d'acqua (16 dB/km a 60 GHz) limitano l'applicazione alle picocelle (raggio tipico 20-100 m) consentendo il riuso delle frequenze nelle celle confinanti e comunicazioni difficili da intercettare e quindi, intrinsecamente, più sicure.

Nelle reti locali e metropolitane di tipo wireless, per consentire l’uso di servizi multimediali (videoconferenze di alta qualità, connessioni di LAN tra edifici, telecamere e TV ad alta definizione, collegamenti IEEE 1394 wireless, collegamento wireless con stampanti, ecc.) che comportano richiesta di elevata capacità per ogni utente (fino ad 1 Gbps), si è già provveduto a creare uno standard IEEE 802.16 e 16a che regola l’accesso wireless a larga banda da 2 a 66 GHz. La wireless MAN è vista come un’alternativa economica alla fibra ottica per risolvere il problema dei costi d’installazione dei cavi nel così detto “last mile”. Un altro sistema d’accesso wireless a larga banda è detto Hybrid Fibre Radio or Radio over Fibre System. In questo caso alcune funzioni, le più costose, delle stazioni radio base vengono remotizzate e concentrate nella stazione centrale, utilizzando la fibra ottica per collegare tale stazione con le stazioni radio base. Utilizzando le onde millimetriche per il collegamento tra le stazioni radio base e i terminali mobili si può sfruttare l’ampia banda a disposizione di queste frequenze per fornire servizi multimediali di elevata qualità, mentre il collegamento in fibra ottica consente il trasporto dei segnali ad alta velocità di cifra. In Fig.3 è illustrato un tipico esempio di rete Radio over Fibre. La modulazione e demodulazione del segnale ottico avviene nella stazione centrale, ove può essere generata otticamente anche la portante a 60 GHz [16] che nelle stazioni radio base, viene convertita in elettrico con un fotodiodo e modulata (vedi Fig.4).

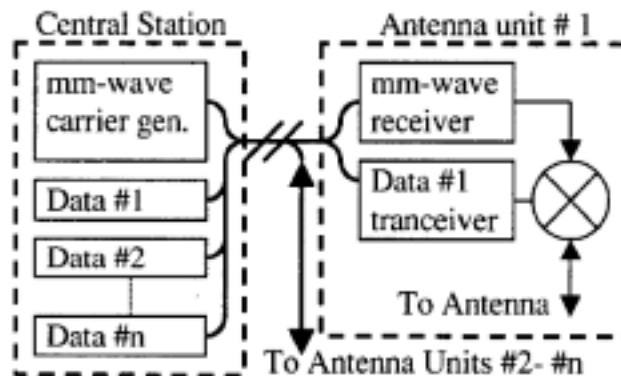


Figura 4 – Esempio di generazione della portante ad onde millimetriche nella stazione centrale [16].

In [17-20] sono riportati diversi metodi per generare otticamente la portante ad onde millimetriche con basso rumore di fase, in modo da consentire l’applicazione di questi trasmettitori in applicazioni ove siano utilizzate tecniche di modulazione ad alta efficienza come quelle QAM/AM o QAM/FM.

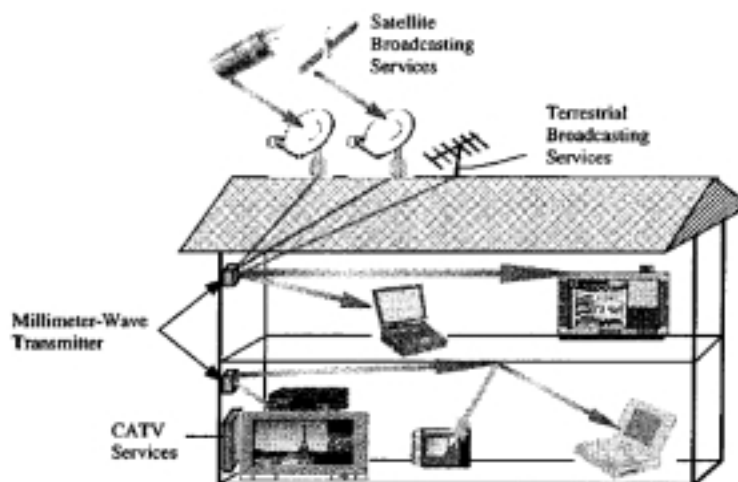


Figura 5 – Esempio di sistema di trasmissione video ad onde millimetriche [20].

In Giappone [20], lo stesso sistema di generazione ottica del segnale ad onde millimetriche è stato ipotizzato come la soluzione più promettente per l’interconnessione ad alta velocità nell’ambito domestico, che gestisce TV satellitare, PC, servizi CATV, elettrodomestici intelligenti, ecc (vedi Fig.5).

Per tutte queste applicazioni la disponibilità di un ricetrasmittitore a 60 GHz a basso costo è la chiave per una diffusione capillare di questa tecnologia.

Un esempio di trasmettitore integrato per onde millimetriche può essere costituito da un laser in mode-locking, sia lineare come in [9] sia ad anello come in [21] (vedi Fig.6). Il laser ad anello ha chiaramente il vantaggio di non necessitare di specchi, ma può esibire problemi di regime bistabile e multistabile [22, 23]. La sezione mode-locking può essere polarizzata inversamente per aumentare l’assorbimento statico. Anche mantenendo moderato il livello di potenza d’uscita del laser ( $\approx$ mW), con un amplificatore ottico in linea di  $L=200-500 \mu\text{m}$  si può alzare la potenza d’uscita a livelli di 7-15 mW. Il fotorivelatore coplanare converte in elettrico il battimento tra i modi generati dal laser. Infine, l’antenna di tipo patch può essere montata con tecnica flip chip o può essere direttamente integrata sulla stessa tessera. L’ingresso di corrente dell’amplificatore ottico può essere utilizzato per modulare in ampiezza la portante e costituire l’ingresso della modulante.

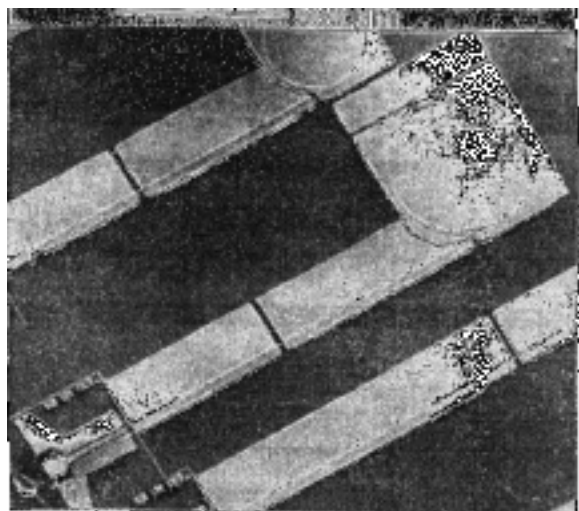
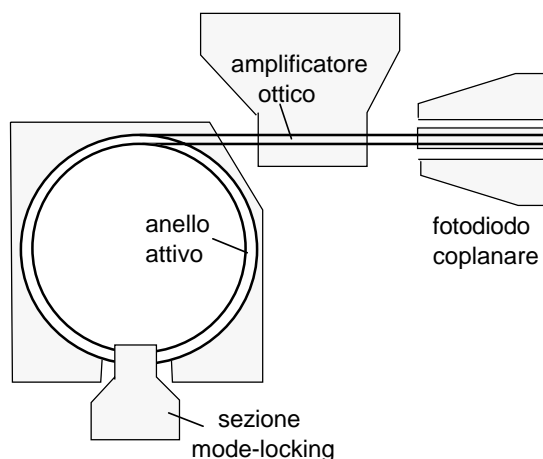


Figura 6 - Ricetrasmittitore integrato per generazione a photomixing della portante a 60 GHz. A sinistra: schema di principio. Destra: microfotografia della tessera realizzata da Vawter et al. in [21].

Per la rivelazione, si può ancora usare una configurazione simile a quella di Fig.6 che, ricevendo simultaneamente la portante ottica e il segnale a 60 GHz, provvede ad eseguire una doppia operazione di mescolamento: una ottica per generare l’oscillatore locale, l’altra elettrica per demodulare il segnale prelevato dall’antenna [24].

### 3. Applicazioni al Terahertz Imaging

Vari laboratori internazionali hanno sviluppato apparati per la visualizzazione di immagini a frequenze del THz (ovvero  $\lambda \approx 300 \mu\text{m}$ , nell’EIR o Estremo Infra Rosso), seguendo il lavoro pionieristico di Zhang (Rensselaer Polytechnic Inst., N.Y.) [25].

L’interesse di questo campo spettrale sta nella parziale trasparenza dei tessuti e dei materiali biologici (Fig.7), che apre nuovi tipi di diagnostica e fornisce un’alternativa immediata all’ispezione radiografica, senza il rischio di esposizione a radiazione ionizzante. Ovviamente il sistema comprende il generatore ottico, il fotorivelatore e un sistema di scansione punto-a-punto (antenna o schiera di antenne) per sintetizzare l’immagine.

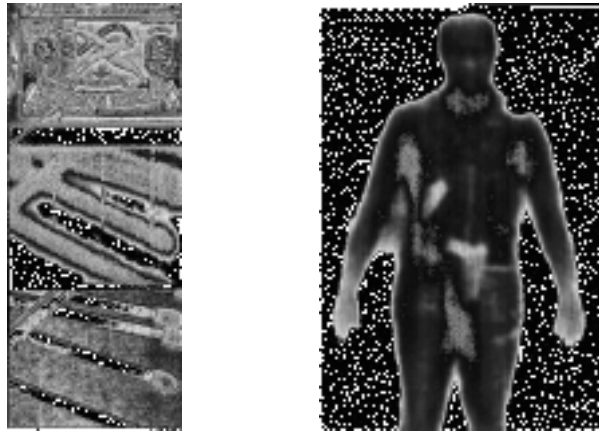


Figura 7 - Esempi di THz-Imaging: fiammiferi visti nella loro scatola (sin) e persona con arma nella cintola (ds) [25]. Frequenza: 90 GHz. Potenza usata: 20 mW (sin) e 10 W (ds). Cortesia di Opto&laser Europe(sin) e di Qinetiq (ds).

## Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito di una collaborazione tra Telecom Italia Lab e il Gruppo di Optoelettronica dell'Università di Pavia.

## Bibliografia

- [1] B. Mason, J.M. Geary, J. Freund, A. Ougazzaden, C. Lentz, K. Glogovski, G. Przybylek, L. Peticolas, F. Walters, L. Reynolds, J. Boardman, T. Kercher, M. Rader, D. Monroe, L. Ketelsen, S. Chandrasekhar, L. Buhl: "40Gb/s Photonic Integrated Receiver with -17dBm Sensitivity", Proc. OFC'2002, March 17-22, Anaheim, CA, Post-Deadline paper FB-10.
- [2] A.H. Gnauck, S. Chandrasekhar, J. Leuthold, L. Stulz: "Demonstration of 42.7-Gb/s DPSK Receiver with 45 Photons/bit Sensitivity", IEEE Phot. Techn. Lett., Vol. 15 (2003), pp.99-101.
- [3] S. Donati: "Photodetectors", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 1999, Chapter 8.3.
- [4] R. Ludwig et al: "Enabling Transmission at 160 Gbit/s", Proc. OFC'2002, Anaheim 17-22 March 2002, paper TuA1, p.1
- [5] C.L. Walker, A.C. Bryce, J.H. Marsh: "Improved catastrophic optical damage level from laser with non absorbing mirrors" IEEE Phot. Techn. Lett., Vol.14 (2002), pp.1394 –1396.
- [6] M. Norgia, R. Migliarina, G. Giuliani, S. Donati: "Metodo di Caratterizzazione di Fotodiodi a Larga Banda Tramite Photomixing con Laser a Basso Costo", Proc. Fotonica 2003.
- [7] D. Wake, C.R. Lima, P.A. Davis: "Optical Generation of Millimeter-Wave Signals for Fiber-Radio Systems using a dual-mode DFB Semiconductor Laser", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.43, No.9, Sept. 1995, pp. 2270-2276.
- [8] G. Großkopf, D. Rohde, R. Eggemann, S. Bauer, C. Bornholdt, M. Mohrle, B. Sartorius, "Optical Millimeter-Wave Generation and Wireless Data Transmission Using a Dual-Mode Laser", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12 Dicembre 2000, p.1692-1694
- [9] M. Passerini, M. Sorel, P. Laybourn: "Generazione di Segnali RF Mediante Diodi Laser *Mode-Locking*", Proc. Fotonica 2003.
- [10] H. Wang, K.W. Chang, L.T. Tran, J.C. Cowels, T.R. Block, E.W. Lin et al.: "Low phase noise millimeter-wave frequency sources using InP-based HBT MMIC technology", IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 31, Oct. 1996, pp.1419-1425.
- [11] N. Shimizu, N. Watanabe, T. Furuta, T. Ishibashi: "InP-InGaAs Uni-Travelling Photodiode with 3dB Bandwidth of over 150 GHz", IEEE Phot. Techn. Lett., vol.10 (1998), pp.412-416.
- [12] K. Kato: "Ultrawide-Bandwidth High Frequency Photodetectors", IEEE Trans. Microw. Theory and Techn., vol.47 (1999) pp.1265-1281

- [13] Q. Chen, Z. Jiang, G. Xu, X.C. Zhang: “Coherent and Widely Tunable THz Waves based on the Frequency Difference Generation”, *Opt. Lett.*, vol.25 (2000), pp.1122-1124.
- [14] E. Peygabarvari et al., "Terahertz electromagnetic generation via optical frequency difference", *IEE Proc.-Optoelectron.*, Vol.149, No.3, Giugno 2002, pp. 82-87.
- [15] K. Williams, R. Esman: “Design Considerations for High-Current Photodetectors” *IEEE J. Lightw. Techn.*, vol.17 (1999), pp.1443-1454.
- [16] L.A. Johansson, X. Wang, N.J. Gomes, A.J. Seeds: “Optical Delivery of millimeter-wave carriers using double injection locking”, *Proc. MTT 2001*, Tu-3.4, pp.89-93.
- [17] R.P. Braun, G. Grosskopf, et al.: "Optical Microwave Generation and Transmission Experiment in the 12- and 60GHz Region for Wireless Communications", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.46, No.4, April 1998, pp. 320-330.
- [18] G., D. Rohde, R. Eggemann, C. Bornholdt, S. Bauer, B. Sartorius, M. Möhrle: “Dual-mode self-pulsating laser for broadband hybrid fibre radio-systems”, *Proc. ECOC 2000*, Mo 1.2.3.
- [19] A.J.C. Vieira, P.R. Herczfeld, et al.: “A mode-locked microchip laser optical transmitter for fiber radio”, *IEEE Trans on Microw. Theory and Techniques*, vol.49 (2001), pp.1882-1887.
- [20] Y. Shoji, K. Hamaguchi, H. Ogawa: “Millimeter Wave Remote Self-Heterodyne System for Extremely Stable and Low-Cost Broad-Band Signal Transmission”, *IEEE Trans on Microw. Theory and Techniques*, vol.50 (2002), pp.1458-1467.
- [21] G.A. Vawter, A. Mar, V. Hietala, J. Zolper, J. Hohimer: “All Optical mm-Wave Generation Using an Integrated Mode-Locked Semiconductor Ring Laser and Photodiode”, *IEEE Phot. Techn. Lett.* vol.12 (1996), pp.1634-1637.
- [22] M. Sorel, P. Laybourn, G. Giuliani, S. Donati: “Unidirectional Bistability in Semiconductor Waveguide Ring Laser”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.80 (2002), paper 048217.
- [23] M. Sorel, P. Laybourn, A. Scirè, S. Balle, G. Giuliani, S. Donati: “Alternate Oscillations in Semiconductor Ring Laser”, *Optics Lett.*, vol.27 (2002), pp.1992-1994.
- [24] S. Donati, T. Tambosso: “Device for information transmission and/or reception by means of millimeters wave signals, corresponding module and method” *Domanda di Brevetto No.805F/WO/GM* (Giugno 2002)
- [25] O. Graydon: “Terahertz Waves penetrate the World of Imaging”, *Opt. Laser Europe*, Oct.2002, pp.22-24.