

Aktivna antena sa rednom vezom tunelskih dioda

Olga Borić-Lubecke* i Tatsuo Itoh**

NASA/JPL*, Pasadena, USA

Department of Electrical Engineering, UCLA**, Los Angeles, USA

Abstract

Connecting several tunneling diodes - resonant tunneling diodes (RTD's) or tunnel diodes - in series has been shown to be a feasible method for increasing the output power and stability of oscillator circuits using these devices. However, such oscillators require special means of triggering due to biasing difficulties associated with their DC instability. RF triggering was proven to be an effective method of initiating such an oscillation in one-port circuits. A brief explanation of the DC instability and the mechanism of RF triggering is presented here. Then, an experimental demonstration of free-space RF triggering of an active antenna with a series connection is described. Active antenna circuits offer excellent isolation between the triggering and oscillation signals and a favorable configuration for spatial power-combining arrays.

Uvod

Rezonantna tunelska dioda (RTD) je još uvek najbrža poluprovodnička komponenta i zbog toga se smatra jednim od kandidata za izvore vrlo visokih učestanosti u budućnosti [1], [2]. Glavni problem oscilatora koji koriste tunelske diode (rezonantne tunelske ili Esaki tunelske diode) je vrlo mala izlazna snaga. Do sada je predloženo nekoliko pristupa za povećanje snage ovih oscilatora [3]-[5]. Pokazano je da redna veza tunelskih dioda može znatno da poveća izlaznu snagu oscilatora kao i stabilnost kola [6]-[8]. Međutim, za oscilatore sa rednom vezom potrebni su posebni načini pobuđivanja, zbog jednosmerne nestabilnosti napona napajanja [6]-[8]. U konfiguraciji sa jednim pristupom je pokazano da se oscilator može uspešno pobuditi spoljnim izvorom mikrotalasnog zračenja koja se dovodi pomoću cirkulatora [9], [10]. Spoljni izvor se može ukloniti pošto kolo počne da osciluje i može biti na učestanosti mnogo nižoj od učestanosti oscilatora.

U ovom radu će prvo biti ukratko objašnjeni nestabilnost napona napajanja redne veze tunelskih

dioda i pobuđivanje spoljnim mikrotalasnim izvorom. Zatim će biti opisano pobuđivanje aktivne antene sa rednom vezom tunelskih dioda na učestanosti od 2.5 GHz. Aktivna antena se ozračuje izvorom mikrotalasnog zračenja i tako se eliminiše potreba za cirkulatorom. Aktivne antene takođe imaju odličnu izolaciju između pobudnog signala i signala oscilatora, kao i pogodnu konfiguraciju za kombinovanje snage kvazioptičkim metodama.

Pobuđivanje mikrotalasnim izvorom

Nestabilnost jednosmernog napajanja u oblasti negativne diferencijalne provodnosti (NDP) se ukratko može objasniti preko uprošćenog modela kola sa rednom vezom dve tunelske diode (slika 1a) i linearnog modela strujne karakteristike diode (slika 1 b). Pretpostavićemo da su diode identične i zaćnemarićemo rednu otpornost dioda. U idealnim uslovima napon napajanja bi bio jednako raspodeljen na dve diode, bez obzira na ukupnu vrednost, ali će se zbog šuma uvek malo razlikovati. Ukupna struja kroz obe diode mora biti identična da bi se zadovoljio Kirhofov zakon, tako da se dolazi do diferencijalne jednaćine za struju kroz diode za slućaj da se obe diode istovremeno napajaju u NDP oblasti:

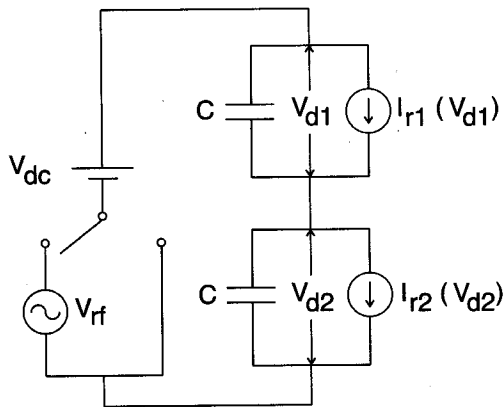
$$C \frac{dV_{d1}}{dt} - \frac{V_{d1}}{R_n} = C \frac{dV_{d2}}{dt} - \frac{V_{d2}}{R_n} \quad (1)$$

gde je $-R_n^{-1}$ nagib strujne karakteristike u NDP oblasti ($R_n > 0$). Rešavajući ovu jednaćinu za razliku napona na diodama, dobija se:

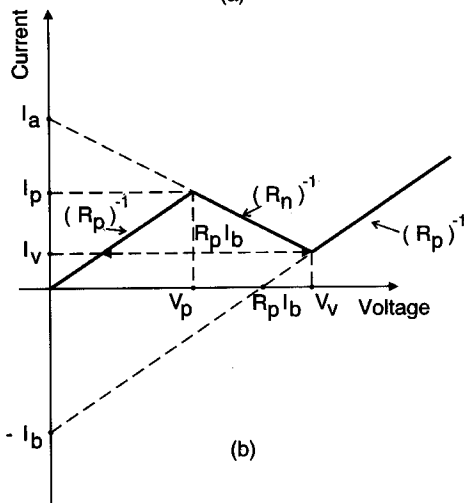
$$\Delta V_d(t) = \Delta V_{d0} e^{t/R_n C} \quad (2)$$

gde je ΔV_{d0} početna vrednost razlike napona na diodama koja se može proceniti na osnovu šuma saćme. Iz jednaćine (2) se može videti da se razlika napona na diodama povećava dok se ukupan napon svake od dioda nalazi u NDP oblasti. Kad ta razlika poraste do $(V_v - V_p)$, diode više nisu polarisane u

NDP oblasti, nego je jedna polarisana na prvoj, a druga na drugoj uzlaznoj grani strujne karakteristike (slika 1b).



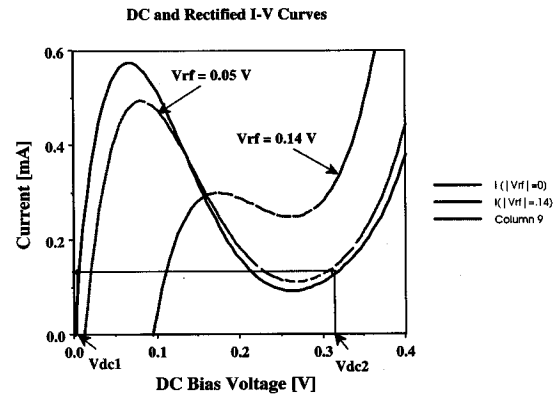
(a)



(b)

Slika 1. Uprošćen model kola oscilatora sa dve redno vezane tunelske diode (a) i linearna aproksimacija strujne karakteristike jedne tunelske diode (b).

To znači da diode ne mogu ostati polarisane u NDP oblasti, ukoliko u kolu ne postoji naizmeničan signal koji mora da zadovolji određene uslove za učestanost i amplitudu oscilovanja [8]. Ukoliko u kolu ne postoji naizmeničan signal, napon napajanja će se podeliti tako da obe diode provode jednaku jednosmernu struju i jedna dioda će biti napajana na prvoj, a druga na drugoj uzlaznoj grani strujne karakteristike. Međutim, ukoliko se u kolo dovede naizmeničan signal i ako su nagibi prve i druge uzlazne grane strujne karakteristike različiti i nelinearni (što je u praksi uvek slučaj), ova raspodela napona napajanja postaje nestabilna i tačke napajanja dioda se mogu istovremeno pomeriti u NDP oblast. Na slici 2 su prikazane tipična jednosmerna karakteristika tunelske diode (M1X1168, Metelics Co.), kao i srednja vrednost strujne karakteristike, ako se na diodu primeni naizmeničan napon amplitude 0.05 V i 0.14 V.



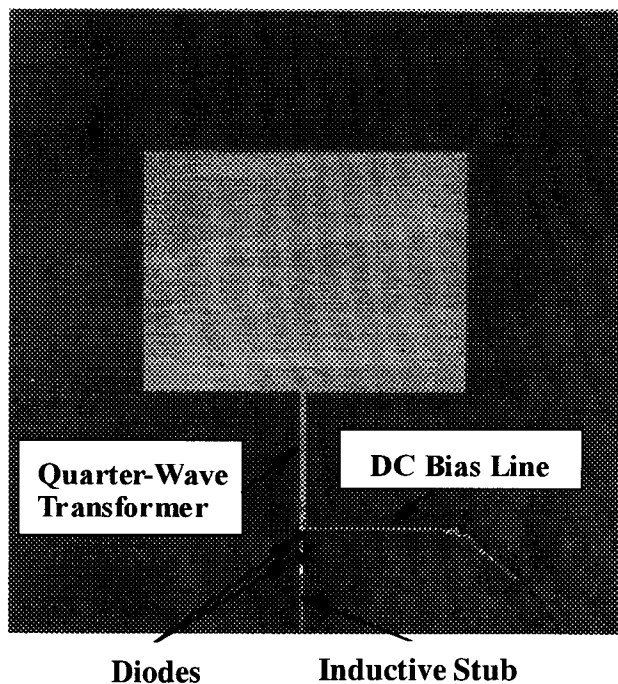
Slika 2. Jednosmerna i "ispravljena" (rectified) strujna karakteristika tunelske diode za primenjen naizmeničan napon amplitude 0.05 V i 0.14 V.

Sa slike se vidi da se srednja vrednost struje kroz provodnost diode smanjuje za diodu polarisanu na prvoj uzlaznoj grani (dioda 1) i povećava za diodu polarisanu na drugoj uzlaznoj grani (dioda 2). Kako ukupna struja kroz obe diode mora biti jednaka, u prelaznom stanju struje kondenzatora diode moraju da uravnoteže ovu promenu, tako da se napon na prvoj diodi povećava, a na drugoj smanjuje. Ovaj proces traje dok se ne izjednače ukupne struje kroz provodnost dioda, a struje kondenzatora postanu jednake nuli, što je jedino moguće ako je ukupan napon napajanja jednako podeljen na dve diode [10].

Signal bilo koje učestanosti može biti primenjen tako da se tačke napajanja pomere sa uzlaznih grana strujne karakteristike u NDP oblast, ako imamo na raspolaganju dovoljnu snagu signala. Međutim, pošto se ukloni pobudni signal, signal oscilovanja neće biti prisutan za sve učestanosti signala pobuđivanja, u zavisnosti od početnih uslova u kolu. Ovo je detaljno ispitano za kola sa jednim pristupom, gde se spoljni signal primenjuje preko cirkulatora [9]-[11]. Ako je spoljni signal na učestanosti oscilatora, vrlo mala snaga je dovoljna za pobuđivanje (više od 10 dB niža od izlazne snage oscilatora) [9]. Ako je učestanost spoljnog signala polovina ili trećina učestanosti oscilatora, snaga pobuđivanja je još uvek niža od snage oscilatora [10]. Ako se koristi signal vrlo niske učestanosti (na primer 2 MHz za pobuđivanje oscilacija na 2 GHz), potrebna snaga je za oko 20 dB viša od izlazne snage oscilatora, sa verovatnoćom od oko 50 % da će se oscilacija održati [11].

Projektovanje aktivne antene

Dve aktivne antene, svaka sa rednom vezom dve tunelske diode, su projektovane na učestanosti od 2.5 GHz. Kako se rezonantno tunelske diode još uvek ne proizvode komercijalno, a u laboratorijama uglavnom ne u planarnoj konfiguraciji, za eksperimente opisane u ovom radu su korišćene Esaki tunelske diode. Ove diode se ponašaju vrlo slično rezonantno tunelskim diodama i mogu se nabaviti u planarnoj konfiguraciji koja se lako montira na mikrostrip kola.



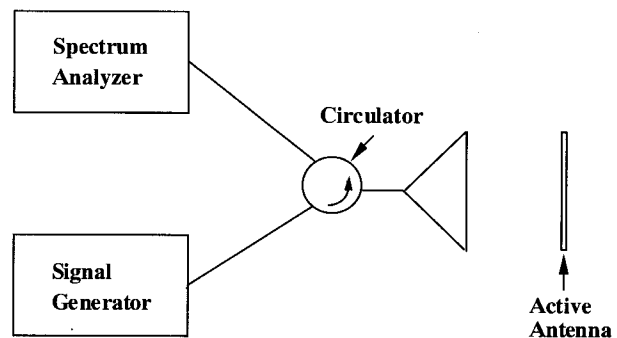
Slika 3. Aktivna antena (kolo 1). Antena je povezana sa diodama preko četvrttalasnog transformatora, a induktivni vod se koristi da se anulira kapacitivnost dioda.

Korišćene su Metelics Co. tunelske diode (M1X1168) koje imaju ukupnu kapacitivnost 0.55 pF, rednu otpornost 6.5Ω i lokalni maksimum struje 0.55 mA (strujna karakteristika je prikazana na slici 2). Ukupna impedansa redne veze dioda je izračunata metodom izloženim u [9]. Mikrostrip "patch" antena je povezana sa diodama preko četvrttalasnog transformatora, a induktivni vod se koristi da se anulira kapacitivan deo impedanse dioda (slika 3). Kolo 1 je projektovano za amplitudu oscilovanja 0.154V na svakoj diodi (što odgovara -16.5 dBm ukupne izlazne snage), a kolo 2 za amplitudu oscilovanja od 0.176 V (-23.6 dBm) [10]. Antena je ista u oba kola, dok se impedansa četvrttalasnog transformatora menja. Dimenzije antene su 50.8mm \times 38.1mm i nalazi se na dielektričnom supstratu Rogers RT-Duroid debljine 0.75 mm i dielektrične konstante 2.33. Vrednosti

rezonantne učestanosti i ulazne impedanse antene, izmerene pomoću analizatora mreže HP 8510, su 2.52 GHz i 190Ω .

Eksperimentalni rezultati

Na kola je prvo primenjen jednosmeran napon napajanja, dovoljan da obe diode budu polarisane u sredini NDP oblasti. Zbog jednosmerne nestabilnosti (jednačina 2) ovaj napon je raspodeljen tako da je jedna dioda polarisana na prvoj uzlaznoj strani strujne karakteristike, a druga na drugoj uzlaznoj strani i kola nisu oscilovala. Kola su zatim ozračena spoljnim signalom učestanosti bliskoj projektovanoj učestanosti kola kroz piramidalnu levkastu antenu (AEL H-1498) sa razdaljine od oko 2 m. Spoljni signal je pomerio tačke napajanja dioda u NDP oblast i uspostavio oscilacije.



Slika 4. Konfiguracija eksperimenta. Cirkulator nije bio potreban za rad kola, ali je korišćen da bi se istovremeno posmatrali pobudni signal i signal oscilatora.

Za spoljni izvor je korišćen HP 8350B "sweep" oscilator sa priključkom HP 83592C. Signal oscilatora je detektovan istom piramidalnom antenom i analizatorom spektra HP 8562A. Cirkulator je korišćen samo da bi se pobudni signal i signal oscilatora mogli istovremeno posmatrati, ali nije bio neophodan za rad kola. Spoljni izvor se može fizički ukloniti i analizator spektra priključiti na njegovo mesto, a da se pri tome ne poremeti signal oscilatora. Ovo naročito može biti korisno na milimetarskim učestanostima za koje ne postoje cirkulatori.

Pošto su oscilacije uspostavljene, signal pobuđivanja je isključen ne poremetivši signal oscilatora. Kolo 1 je oscilovalo na učestanosti 2.55 GHz, sa "efektivnom isotropnom izračenom" snagom (EIRP) -15 dBm, a kolo 2 na 2.65 GHz sa snagom -20 dBm. Ako pretpostavimo da je pojačanje antene 2.5 dB, diode su dale -17.5 dBm u kolu 1 i -22.5 dBm u kolu 2. Ove snage se razlikuju od procenjenih snaga samo za 1 dB. Kolo 1 se može pobuditi snagom -22

dBm primljenom na anteni, u opsegu od 10 MHz oko učestanosti oscilovanja, dok se kolo 2 može pobuditi snagom -14 dBm u opsegu od 60 MHz. Pobudna snaga zavisi od amplitude oscilovanja, koja je različita za ova dva kola. Za kolo sa višom amplitudom oscilovanja (i manjom snagom, kolo 2) je potrebno više snage nego za kolo sa nižom amplitudom oscilovanja (i višom snagom, kolo 1) [10]. Kola sa aktivnom antenom se principijelno ponašaju isto kao kola sa jednim pristupom.

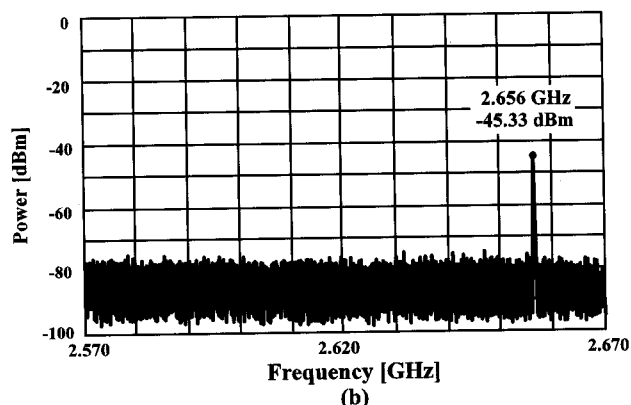
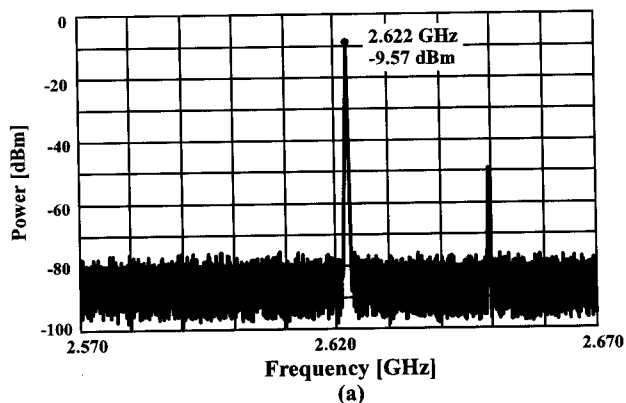
Na slici 5 je prikazan spektar kola 2 za vreme (a) i posle pobuđivanja (b). U ovom slučaju je pobudni signal na udaljenosti od 0.5 m od antene, da bismo mogli da posmatramo pobudni signal i signal oscilovanja u istoj razmeri. Prikazana jačina pobudnog signala je snaga koju prima analizator spektra kroz cirkulator i znatno je viša od snage koju prima antena. Pobudni signal "vuče" signal oscilovanja i zbog toga se snaga i učestanost oscilacija malo menjaju posto se isključuje pobudni signal.

Nije bilo moguće testirati "subharmonijsko" pobuđivanje [10] i pobuđivanje vrlo niskim učestanostima [11], jer je antena projektovana na prvoj rezonansi i prema tome nije mogla da prima niže učestanosti. Da smo projektovali antenu na drugoj rezonansi, bilo bi moguće testirati pobuđivanje signalom učestanosti jednake trećini učestanosti oscilatora. Međutim, u praksi je jednostavnije da se koristi prorezna antena na poledini kola za subharmonijsko pobuđivanje. Prorezna antena ima širi propusni opseg i ima rezonanse na svim umnošcima polovine talasne dužine. Snaga koju bi primila ova antena bi se dovela na mikrotalasni vod za koji su povezane diode sa druge strane supstrata i tako započela oscilacije.

Zaključak

Redna veza tunelskih dioda može znatno povisiti snagu oscilatora koje koriste ove diode. Međutim, zbog jednosmerne nestabilnosti napona napajanja, za oscilatore sa rednom vezom su potrebni posebni načini pobuđivanja. Pobuđivanje spoljnim mikrotalasnim izvorom je efikasan metod koji se može primeniti na kola sa jednim pristupom preko cirkulatora i na kola sa aktivnim antenama putem zračenja. Pobuđivanje aktivne antene je eksperimentalno pokazano na učestanosti 2.5 GHz za mikrostrip "patch" antenu sa dve tunelske diode. Izračena snaga je vrlo približna projektovanoj snazi od koje se razlikuje samo za 1 dB. Ponašanje aktivnih antena sa rednom vezom tunelskih dioda se slaže sa ranije dobijenim rezultatima za kola sa jednim pristupom. Kako je aktivna antena projektovana na

prvoj rezonansi, nije bilo moguće testirati pobuđivanje nižim učestanostima. Ako se doda prorezna antena na poledini kola, mogla bi se testirati "subharmonijska" pobuda. Pobuđivanje spoljnim izvorom putem zračenja je naročito pogodno za više milimetarske učestanosti za koje cirkulatori ne postoje, kao i za kombinovanje snage kvazioptičkim metodama.



Slika 5. Spektar kola 2 za vreme (a) i posle pobuđivanja (b), prijemnom piramidalnom antenom na razdaljini od 0.5 m od aktivne antene. Prikazana jačina pobudnog signala je snaga koju prima analizator spektra, koja je znatno viša od snage koju prima aktivna antena.

Literatura

- [1] E. R. Brown, J. R. Soderstrom, C. D. Parker, L. J. Mahoney, K. M. Molvar, and T. C. McGill, "Oscillations up to 712 GHz in InAs/AlSb resonant-tunneling-diodes," *App. Phys. Lett.*, vol. 58, pp. 2291-2293, May 1991.
- [2] E. R. Brown, T. C. L. G. Sollner, C. D. Parker, W. D. Goodhue and C. L. Chen, "Oscillations up to 420 GHz in GaAs/AlAs resonant tunneling diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 55, no. 17, pp. 1777-1779, October 1989.

- [3] D. P. Steenson, R. E. Miles, R. D. Pollard, J. M. Chamberlain and M. Henini, "Demonstration of power combining at W-band from GaAs/AlAs resonant tunneling diodes," *Proc. of the Fifth Inter. Symp. on Space THz Tech.*, pp. 756-767, Ann Arbor, Michigan, May 10-12, 1994.
- [4] K. D. Stephan, S. C. Wang, E. R. Brown, K. M. Molvar, A. R. Calawa and M. J. Mantra, "5 mW parallel-connected resonant-tunneling diode oscillator," *Elec. Lett.*, vol. 28, no. 15, pp. 1411-1412, July 1992.
- [5] M. P. DeLisio, J. F. Davis, S. J. Li, D. B. Rutledge and J. J. Rosenberg, "A 16-element tunnel diode grid oscillator," *Proc. of the 1995 IEEE AP-S Inter. Symp.*, pp. 1284-1287, Newport Beach, California, June 19-23, 1995.
- [6] Y. I. Vorontsov and I. V. Polyakov, "Study of oscillatory processes in circuits with several series-connected tunnel diodes," *Radio Eng. Electron. Phys.*, vol. 10, pp. 758-763, May 1965.
- [7] C. C. Yang and D. S. Pan, "Theoretical investigations of a proposed series integration of resonant tunneling diodes for millimeter-wave power generation", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 40, pp. 434-441, March 1992.
- [8] O. Boric-Lubecke, D. S. Pan and T. Itoh, "DC Instability of the Series Connection of Tunneling Diodes", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 936-943, June 1996.
- [9] O. Boric-Lubecke, D. S. Pan and T. Itoh, "RF Excitation of an oscillator with several tunneling devices in series," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 4, pp. 364-366, November 1994.
- [10] O. Boric-Lubecke, D. S. Pan and T. Itoh, "Fundamental and subharmonic excitation for an oscillator with several tunneling diodes in series," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 969-976, April 1995.
- [11] O. Boric-Lubecke, D. S. Pan and T. Itoh, "Low Frequency Triggering of Oscillators with a Series Connection of Tunneling Diodes," *Proc. of the 1995 International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS)*, pp. 251-254, December 6-8, 1995, Charlottesville, Virginia.