



INVESTIGATION OF CURRENT-VOLTAGE MEASUREMENTS OF GaAs /Al_xGa_{1-x}As MULTIPLE QUANTUM WELLS WITH METAL ORGANIC VAPOUR PHASE EPITAXY

Aslan Türkoğlu^{*1} , Yüksel Ergün² 

¹Bağımsız Araştırmacı, Türkiye.

²Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Böl., Eskişehir, Türkiye.

Abstract

Original scientific paper

In this study, we have investigated the temperature dependence of Current-Voltage measurements of GaAs /AlGaAs multi-quantum well. Our sample, which consists of inclined layers between the 10 periods GaAs /Al_{0.25}Ga_{0.75}As quantum wells and n⁺ – GaAs contact layers in the central region, was grown by the Metal Organic Vapor Phase Epitaxy technique. We have found that tunneling current is effective at low temperatures (<85 K) and high voltages as well as thermal current at high temperatures (> 125 K) and low voltages. In addition, in the intermediate temperature region (65 K <T <125 K), tunneling and thermal stimulation processes appear to be effective together..

Keywords: GaAs / AlGaAs multiple quantum well, metal organic vapor phase epitaxy, current-voltage measurement.

METAL ORGANİK BUHAR FAZ EPİTAKSİSİ İLE BÜYÜTÜLEN GaAs /Al_xGa_{1-x}As ÇOKLU KUANTUM KUYULARININ AKIM-VOLTAJ ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Özet

Orijinal bilimsel makale

Bu çalışmada, GaAs/AlGaAs çoklu kuantum kuyusunun Akım-Voltaj ölçümlerinin sıcaklığa bağlılığını incelenmiştir. Merkez bölgesinde 10 adet GaAs /Al_{0.25}Ga_{0.75}As kuantum kuyusu ile n⁺ – GaAs kontak tabakaları arasında eğimli tabakalardan oluşan örnek, Metal Organik Buhar Fazlı Epitaksi tekniği ile büyütülmüştür. Tünelleme akımının düşük sıcaklıklarda (<85 K) ve yüksek voltajlarda bununla birlikte termal akımında yüksek sıcaklıklarda (>125 K) ve düşük voltajlarda etkili olduğunu bulduk. Ayrıca, ara sıcaklık bölgesinde (65 K<T<125 K) tünelleme ve ısıl uyuram işlemlerinin birlikte etkili olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: GaAs / AlGaAs çoklu kuantum kuyusu, metal organik buhar fazlı epitaksi, akım-voltaj ölçümü.

1 Giriş

Kızılötesi dedektörler, askeri ve sivil amaçlar için termal görüntüleme, yön belirleme ve iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1-10]. Kızılötesi dedektörler algılama şekline bağlı olarak, kuantum kuyu içeren ve içermeyenler olarak ikiye ayrılabilir. Kuantum kuyu içermeyen kızılötesi dedektörlerin algılama aralığı yaklaşık 6 – 20 μm'dir. Bu aygıtlarda Hg_{1-x}Cd_xTe ve Pb_{1-x}Sn_xTe gibi dar yasak enerji aralığına sahip yarıiletkenler kullanılmaktadır [11-12]. Bu yarıiletken alaşımların yasak enerji aralıkları Cd ve Sn konsantrasyonuna bağlıdır.

Geniş bant aralıklı malzemeler, daha dar bant aralıklı malzemelerle karşılaştırıldığında onları yararlı kılan çeşitli özelliklere sahiptir. Daha yüksek enerji boşluğu,

cihazlara daha yüksek sıcaklıklarda çalışma yeteneği verir, çünkü bant aralıkları tipik olarak artan sıcaklıkla küçülür ve bu, geleneksel yarı iletkenler kullanılırken sorun yaratabilir. Bazı uygulamalar için geniş bant aralıklı malzemeler, cihazların daha büyük voltajları değiştirmesine izin verir. Geniş bant aralığı ayrıca elektronik geçiş enerjisini görünür ışık enerjisi aralığına getirir ve bu nedenle ışık yayan diyotlar ve yarı iletken lazerler gibi görünür spektrumda yayan veya hatta ultraviyole radyasyon üreten ışık yayan cihazlar yapılabilir [13].

Böylece, büyük yasak enerji aralıklı yarıiletken tabakalar içinde kuantum kuyu bulunan kızılötesi dedektörler üretilmeye başlanmıştır [14]. Kuantum Kuyu kızılötesi fotodedektörlerde (Quantum Well Infrared Photodetectors, QWIP) kullanılan geniş yasak aralıklı

* Corresponding author.

E-mail address: aslan.turkoglu@gmail.com (A. Türkoğlu)

Received 14 April 2021; Received in revised form 17 May 2021; Accepted 25 May 2021

2587-1943 | © 2021 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.915840>

yariletken tabakaların büyütülmesi, işlenmesi ve elektronik cihazlarda kullanımı daha kolaydır. Ayrıca, bu yariletken ve alaşımların yüksek ısıl kararlılığı, yüksek safsızlıkta üretilebilmeleri, daha ucuz olmaları, büyük boyutlarda elektronik cihazlarda kullanımı ve düşük gürültülü olmaları gibi özellikleri tercih nedeni olmaktadır. QWIP'lerin performansını gürültü seviyesi, algılamaya tepki verme hızı ve karanlık akımı gibi parametreler belirlemektedir [15]. Kuantum kuyu içeren yariletken engel yapılarında enerji altbandlarının ve dikey elektriksel iletimin teorik olarak incelenmesi ilk defa Esaki ve Tsu [16] tarafından yapılmıştır. Elektronik transport özelliklerinin deneysel olarak incelendiği ilk çalışma ise 50 adet GaAs /Al_xGa_{1-x}As kuantum kuyusu içeren engel yapıda Chang ve arkadaşları [17] tarafından gerçekleştirilmiştir. Kuantum kuyu içeren GaAs /Al_xGa_{1-x}As engel yapıların kızılötesi algılamada kullanılabileceği ilk olarak Esaki ve Sakaki [18] tarafından öngörülmüştür. Bu engel yapıları, Chui ve arkadaşları [19] deneysel olarak, Coon ve Karunasiri [20] ise teorik olarak incelemiştir. Bound-to-bound geçişler ilk defa 50 adet GaAs /Al_xGa_{1-x}As kuantum kuyu içeren GaAs /Al_xGa_{1-x}As engel yapılarında West ve Eglash [21] tarafından gözlenmiştir. Algılama dalga boyu 10.8 μm olan ve QWIP olarak çalışan ilk aygıt, Levine ve arkadaşları [22] tarafından üretilmiştir. QWIP'de çoklu kuantum kuyusunun parametrelerini ayarlayarak, geniş bir spektrumda kızılötesi algılama gerçekleştirilebilir. Bunlar şu şekilde sınıflandırılabilir: i) Kısa dalgaboylu kızılötesi (Short Wavelength Infrared, SWIR, $\lambda = 1 - 3 \mu\text{m}$), ii) Orta dalgaboylu kızılötesi (Medium Wavelength Infrared, MWIR, $\lambda = 3 - 5 \mu\text{m}$), iii) Uzun dalgaboylu kızılötesi (Long Wavelength Infrared, LWIR, $\lambda = 8 - 12 \mu\text{m}$) ve iv) Çok Uzun dalgaboylu kızılötesi (Very Long Wavelength Infrared, VLWIR, $\lambda > 12 \mu\text{m}$).

Bu çalışmada, GaAs /Al_xGa_{1-x}As QWIP yapısının Akım-Voltaj özelliklerinin sıcaklık bağımlılıkları araştırılmıştır. Çalışmamızın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de örnek yapısının üretimini ve Akım-Voltaj ölçümlerini veriyoruz. Son bölümde ise elde edilen bulguları tartışacağız.

2 Materyal ve Method

Çoklu kuantum kuyusu örneği, Metal Organik Buhar Fazlı Epitaksi (MOVPE) methodu ile bir n⁺ - GaAs alt taşı üzerine büyütülmüştür. Şekil 1'de gösterildiği gibi, ilk olarak $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ yoğunluklu Karbon akseptörü bir 1 μm n⁺ - GaAs tabakası büyütülmüştür. Daha sonra, katkısız ve simetrik Al_xGa_{1-x}As bariyeri aşağıdaki adımlarla büyütülmüştür. İlk olarak, x konsantrasyonunun 0'dan 0.25'e yükseltildiği 500 A⁰'luk eğimli bir tabakası daha sonra GaAs kuantum kuyular içeren/içermeyen 1400 A⁰ 'luk bir genişliğe sahip merkezi Al_{0.25}Ga_{0.75}As bölgesinin üzerine x konsantrasyonunun 0.25'ten 0'a düştüğü bir 500 A⁰ eğimli tabaka oluşturulmuştur. Son olarak, üst tarafta 1 mm kalınlığında n⁺ - GaAs ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) tabakası büyütülmüştür.

2.1 Akım-Voltaj Ölçümleri

Bir yapıda yüksek potansiyelde tutulan kontak bölgesine (anod) en yakın kuantum kuyu ve engellerin oluşturduğu bölge, yüksek elektrik alan bölgesi (HEFD), yapının geri kalan kısmına da düşük elektrik alan bölgesi (LEFD) adı verilir. Literatürde, LEFD ve HEFD oluşumunu açıklamak için çeşitli yaklaşımlar vardır. Chang ve arkadaşları [17] çalışmalarında, GaAs /Al_xGa_{1-x}As süperörgüde farklı elektrik alan büyüklüklerine sahip bölgelerin oluşumunu yapısal düzensizliklere bağlamışlardır. Daha sonraki yıllarda, Levine ve arkadaşları [22] ile Choi ve arkadaşları [23], engel yapılarında ölçülen Akım-Voltaj eğrisinde gözlenen osilasyonlu davranışı açıklamak için uzay yükü (space charge) etkisini ön plana çıkarmışlardır. Onlar, uzay yükünü, engel yapıdaki kuantum kuyularının elektronlar için tuzak olarak davranması sonucunda oluştuğunu göstermişlerdir. Bu tuzaklanma nedeniyle anoda yakın bölgede uzay yükü birikmekte ve HEFD meydana gelmektedir. Bu durum, 4 tane kuantum kuyusu içeren yapı için ele alınarak anlatılacaktır. Burada ele alınacak yapının enerji bandları temsili olarak Şekil 2'de verilmektedir.

Uzay yükünün kuvvetli perdeleme özelliğinden dolayı engel yapının HEFD dışında kalan bölgeleri uygulanan gerilimi daha az görmektedir ve bu kısımda LEFD meydana gelmektedir. Bu yeni durumda, LEFD içindeki kuantum kuyusunun E₁ enerjili altbandı ile sürekli enerji düzeyleri aynı seviyeye gelir ve E₁' den sürekli enerji düzeylerine geçiş meydana gelir. Bu koşul sağlandığında dikey akımda bir maksimum gözlenir. Bu durum, E₁ enerjili altbandından sürekli enerji durumlarına geçişte söz konusu olur. Böylece, HEFD'deki tek kuantum kuyusundaki E₁ enerjili altbandda bulunan elektronlar, dikey iletimi sağlamak için, taban altbandı tünelleme yoluyla anoda geçerler. E₁ enerjili altbandı ile sürekli enerji düzeyleri rezonans durumu, periyot başına düşen gerilimin $\Delta E_1/e$ kadar artmasından sonra bozulur, yani tünelleme olasılığı tekrar azalır ve sonuç olarak, dikey akımda bir azalma meydana gelir ($\Delta E_1, E_1$ altbandı enerji genişliğidir). Yapıya uygulanan gerilim biraz daha artırıldığında, HEFD hemen yanındaki komşu kuantum kuyuyu da içine alacak şekilde genişler; E₁ enerjili altbandı ile sürekli enerji düzeyleri yeniden aynı düzeye gelir. Bu durumda, E₁' den sürekli enerji düzeyleri arası sıralı tünelleme olayına bir kuyu daha katılmış olur ve dikey akımda bir maksimum daha gözlenir. Böylece, yapıya uygulanan voltajla sağlanan rezonans durumunda dikey akımda artış, rezonansdan çıkınca ise azalış meydana gelmektedir. Rezonans durumu bozulduğunda sıralı tünelleme olasılığı azaldığından dikey akım azalmakta; sonraki ilk rezonans durumuna kadar akım bir minimumdan geçmekte ve gerilim artışı ile birlikte tünelleme olasılığı artacağı için dikey akım artmaya başlamaktadır. Bu durum, ardışık rezonans ve rezonansdan uzaklaşma durumlarında kendini tekrar etmekte ve neticede dikey akımda gerilime bağlı olarak osilasyonlar oluşmaktadır. Yapıya uygulanan gerilimin yeterince yüksek değerlerinde HEFD tüm engel yapıyı kapsayabilir (Şekil 3). Bu durumda, sadece E₁ enerjili altbandı ile sürekli enerji düzeyleri, sıralı rezonans tünellemesi meydana gelir ve dikey Akım-Voltaj eğrisinde sonuncu osilasyonlar gözlenir.

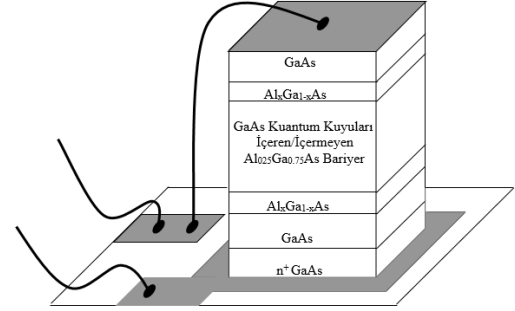
Akım-Voltaj ölçümleri, örneklerin kontaklarının kalitesini, yapı içerisindeki taşıma mekanizmalarını ve elektrik alanın fonksiyonu olarak taşıyıcıların sürüklenme hızını ve mobilitesini belirlemede kullanılır. Deneylerde, örneğimizin Akım-Voltaj karakteristikleri 65-125 Kelvin arasındaki sıcaklıklarda incelenmiştir. Akım-Voltaj ölçümlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekiller 4-6'da verilmiştir.

Üstte de bahsedildiği gibi, akımda voltaja bağlı olarak görülen osilasyonların sayısı yapıdaki periyot sayısı ile ilişkilidir. Anoda komşu ilk kuantum kuyuda HEFD oluşmasından sonra dikey akımda bir maksimum meydana gelmesi ve HEFD'nin komşu kuantum kuyuları sırayla (bire bir) içine alarak yayılması nedeniyle, Akım-Voltaj eğrisinde çoklu kuantum kuyusundaki periyot sayısının bir eksiği kadar osilasyon meydana gelmesi beklenmektedir. Eğer ilk oluşan HEFD anoda yakın bölgede birden fazla kuantum kuyuyu içine alacak şekilde oluşursa, ölçülen Akım-Voltaj eğrisindeki osilasyon sayısı, çoklu kuantum kuyusundaki toplam periyot sayısı ile HEFD içindeki kuantum kuyu sayısı farkı kadar olacaktır (Vuong ve Tsui, 1989). Bizim yapımızda 10 tane kuantum kuyusu bulunmaktadır. Bu noktadan hareketle ilk oluşan HEFD, 4 tane kuyuyu içine alacak şekilde oluşmuştur. Bu nedenle bu deneyde gözlenen Akım-Voltaj eğrisinde osilasyon sayısı beş tane olarak gözükmektedir. Ayrıca, Şekiller 4-6'dan anlaşılacağı gibi, sıcaklık değeri arttıkça bir yandan aynı voltaj değerine karşı gelen akım değeri artarken bir yandan da Akım-Voltaj eğrisinde gözlenen osilasyonların genlikleri azalmaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklara doğru çıkıldıkça Akım-Voltaj eğrisindeki osilasyonlar kaybolmaktadır. Bunun nedeni ise elektronların enerjilerinin sıcaklıkla birlikte artmasıdır. Elektronların artan enerjisiyle, sürekli enerji düzeylerine sıçrama olasılıkları tünelleme olasılığından daha fazla olmaktadır. Bu nedenle, artan sıcaklıkla birlikte osilasyonlar da kaybolmaktadır.

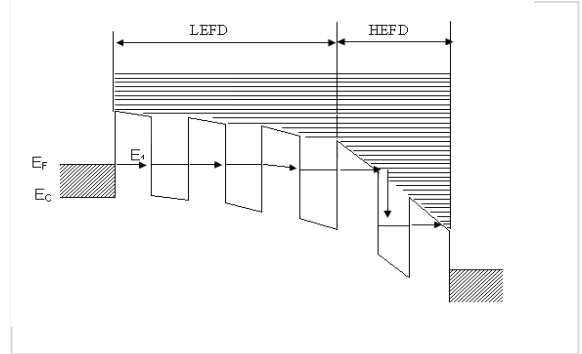
3 Sonuçlar

Bu çalışmada, merkez bölgesinde 10 tane GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As kuantum kuyu ile n⁺ - GaAs kontak tabakaları arasında eğimli tabakalar bulunan engel yapısında dikey iletim mekanizmaları deneysel olarak incelendi. Bunun için, 0-1 Volt aralığında DC gerilimi uygulanarak, akımın numuneye uygulanan gerilimle değişimi ölçüldü. Çoklu kuantum kuyusu içeren engel yapının düşük sıcaklık Akım-Voltaj grafiklerinde, başlangıçtaki artıştan sonra, akım artış hızının aniden azaldığı ve daha yüksek gerilimlerde osilasyonlar olduğu gözlemlendi. Bu osilasyonların sebebi, çoklu kuantum kuyusunun anot (pozitif potansiyeldeki n⁺ - GaAs) tabakası tarafındaki kısmında yüksek elektrik alan bölgesi oluşmasına ve numuneye uygulanan gerilim arttıkça yüksek elektrik alan bölgesinin en yakın kuantum kuyuyu içine alarak çoklu kuantum kuyu boyunca adım adım yayılmasıdır. Bu numunedeki, kuantum kuyular arasındaki Al_{0.25}Ga_{0.75}As engel tabakası yeterince ince olduğundan, çoklu kuantum kuyusundaki taban altbandı sıralı rezonans tünellemesi gerçekleştirir. Taban altbandı sıralı rezonans tünellemesi durumunun bozulduğu her gerilim değerinde dikey akımda belirgin bir azalma

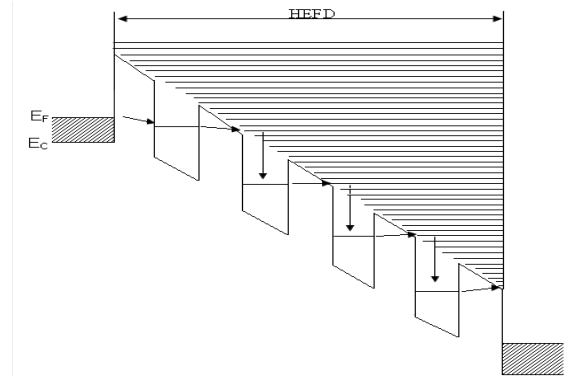
(minimum) meydana gelir. Düşük elektrik alan bölgesinde son kuantum kuyunun taban altbandı ile yüksek elektrik alan bölgesinde ilk kuantum kuyu üzerinde bulunan sürekli enerji düzeyleri rezonans durumuna geldiğinde, dikey akımda bir maksimum gözlemlendi. Yüksek elektrik alan bölgesi yayılmasını tamamlayıp tüm kuantum kuyularını kapsadıktan sonra ise osilasyonların sona erdiği gözlemlendi.



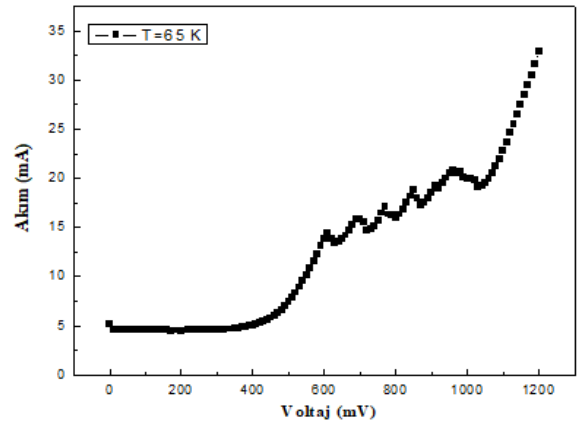
Şekil 1. Örnek Yapısı.



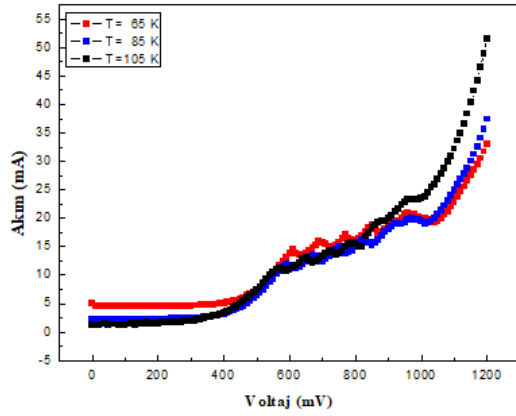
Şekil 2. HEFD'de bir kuantum kuyusu varken enerji band diyagramı.



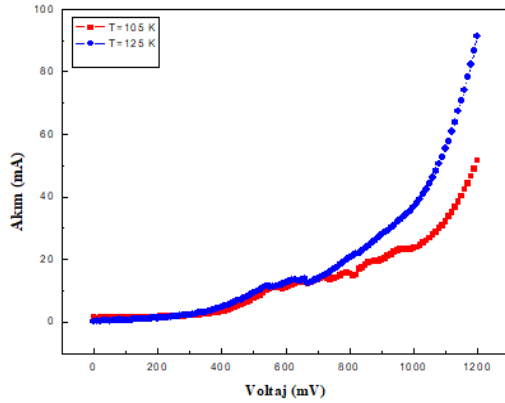
Şekil 3. HEFD'de 4 tane kuantum kuyusu içermesi durumunda, yapının enerji band diyagramı.



Şekil 4. 65 Kelvin sıcaklıkta gözlenen Akım-Voltaj ölçümleri.



Şekil 5. Üç farklı sıcaklık değerinde gözlenen Akım-Voltaj ölçümlerinin karşılaştırılması.



Şekil 6. İki farklı sıcaklık değerlerinde gözlenen akım-voltaj eğrilerinin karşılaştırılması.

Bilgilendirme

Bu çalışmada etik kurul onay belgesine ihtiyaç bulunmamaktadır. Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Rafol, D., Cho, E., & Lim, W. (2007, September). Characterization of very large format 1Kx1K LWIR QWIP focal plane array. *In Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XV* (Vol. 6678, p. 66780X). International Society for Optics and Photonics.
- [2] Robo, J. A., Costard, E., Truffer, J. P., Nedelcu, A., Marcadet, X., & Bois, P. (2009, May). QWIP focal plane arrays performances from MWIR up to VLWIR. *In Infrared Technology and Applications XXXV* (Vol. 7298, p. 72980F). International Society for Optics and Photonics.
- [3] Reibel, Y., Rubaldo, L., Manissadjian, A., Billon-Lanfrey, D., Rothman, J., de Borniol, E., ... & Costard, E. (2012, November). High-performance MCT and QWIP IR detectors at Sofradir. *In Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IX* (Vol. 8541, p. 85410A). International Society for Optics and Photonics.
- [4] Gunapala, S. D., Bandara, S. V., Liu, J. K., Mumolo, J. M., Rafol, B., Ting, D. Z., ... & Hill, C. (2014). Quantum well infrared photodetector technology and applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 20(6), 154-165.
- [5] Martijn, H., Gamfeldt, A., Asplund, C., Smuk, S., Kataria, H., & Costard, E. (2016, May). QWIPs at IRnova, a status update. *In Infrared Technology and Applications XLII* (Vol. 9819, p. 981918). International Society for Optics and Photonics.

- [6] Demir, I., Kasapoğlu, A. E., Budak, H. F., Gür, E., & Elagoz, S. (2020). Influences of thickness and temperature of low temperature GaAs buffer layer on two-step MOVPE grown GaAs/Ge heterostructures. *The European Physical Journal Applied Physics*, 90(2), 20301.
- [7] Ladugin, M. A., Yarotskaya, I. V., Bagaev, T. A., Telegin, K. Y., Andreev, A. Y., Zasavitskii, I. I., ... & Marmalyuk, A. A. (2019). Advanced AlGaAs/GaAs heterostructures grown by MOVPE. *Crystals*, 9(6), 305.
- [8] Demir, I. (2019). The contribution of AsH₃: Pre-flow and V/III ratio effects on heteroepitaxially grown GaAs/Ge. *Superlattices and Microstructures*, 128, 1-8.
- [9] Smiri, B., Arbia, M. B., Ilkay, D., Saidi, F., Othmen, Z., Dkhil, B., ... & Maaref, H. (2020). Optical and structural properties of In-rich In_xGa_{1-x}As epitaxial layers on (1 0 0) InP for SWIR detectors. *Materials Science and Engineering: B*, 262, 114769.
- [10] Kim, H., Ahn, S. Y., & Wasilewski, Z. (2019). Fabrication of grating coupled GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector on an Si substrate. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 37(3), 031209.
- [11] Rogalski, A. (1997). Comparison of the performance of quantum well and conventional bulk infrared photodetectors. *Infrared physics & technology*, 38(5), 295-310.
- [12] Razeghi, M., Erdtmann, M., Jelen, C., Guastavinos, F., Brown, G. J., & Park, Y. S. (2001). Development of quantum well infrared photodetectors at the Center for Quantum Devices. *Infrared physics & technology*, 42(3-5), 135-148.
- [13] Kirschman, R. K. (Ed.). (1999). *High temperature electronics* (pp. p-42). New York, NY: IEEE press..
- [14] Perera, A. G. U., Shen, W. Z., Matsik, S. G., Liu, H. C., Buchanan, M., & Schaff, W. J. (1998). GaAs/AlGaAs quantum well photodetectors with a cutoff wavelength at 28 μ m. *Applied physics letters*, 72(13), 1596-1598.
- [15] Levine, B. F. (1993). Quantum-well infrared photodetectors. *Journal of applied physics*, 74(8), R1-R81.
- [16] Esaki, L., & Tsu, R. (1969). Superlattice and negative conductivity in semiconductors, IBM Res. Note, RC-2418.
- [17] Chang, L., Esaki, L., & Tsu, R. (1974). Resonant tunneling in semiconductor double barriers. *Applied Physics Letters*, 24(12), 593-595.
- [18] Esaki, L. (1977). A new photoconductor. *IBM Tech. Discl. Bull.*, 20(2456).
- [19] Chiu, L. C., Smith, J. S., Margalit, S., & Yariv, A. (1983). Internal photoemission from quantum well heterojunction superlattices by phononless free-carrier absorption. *Applied physics letters*, 43(4), 331-332.
- [20] Coon, D. D., & Karunasiri, R. P. G. (1984). New mode of IR detection using quantum wells. *Applied Physics Letters*, 45(6), 649-651.
- [21] West, L. C., & Eglash, S. J. (1985). First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well. *Applied Physics Letters*, 46(12), 1156-1158.
- [22] Levine, B. F., Choi, K. K., Bethea, C. G., Walker, J., & Malik, R. J. (1987). New 10 μ m infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices. *Applied physics letters*, 50(16), 1092-1094.
- [23] Choi, K. K., Levine, B. F., Malik, R. J., Walker, J., & Bethea, C. G. (1987). Periodic negative conductance by sequential resonant tunneling through an expanding high-field superlattice domain. *Physical Review B*, 35(8), 4172.
- [24] Vuong, T. H. H., Tsui, D. C., & Tsang, W. T. (1989). Transport through InGaAs-InP superlattices grown by chemical beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 66(8), 3688-3697.