

## Диод Ганна с индуцированным каналом в активной области

Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,  
61077, г. Харьков, пл. Свободы 4,*

*Статья поступила в редакцию 21 декабря 2001 г.*

Представлены результаты теоретического исследования работы субмикронных диодов Ганна с активной областью без ионизированных примесей и с модуляцией проводимости в ней. Показано, что модуляция проводимости и отсутствие ионизированных примесей в активной области диода увеличивают его эффективность, ширину частотного диапазона и оптимальную частоту генерации.

Подано результати теоретичного дослідження роботи субмікронних діодів Ганна з активною областю без іонізованих домішок і з модуляцією провідності в ній. Показано, що модуляція провідності і відсутність іонізованих домішок в активній області діода збільшують його ефективність, ширину частотного діапазону і оптимальну частоту генерації.

### Введение

Известно, что эффективность коротких диодов Ганна, работающих в миллиметровом диапазоне, во многом определяют контактные явления. В наиболее часто применяемой на практике  $n^+ - n - n^-$ -структуре GaAs диода максимальная частота  $\sim 65$  ГГц определяется длиной “мертвой зоны” диода ( $\sim 1$  мкм) [1]. Приблизительно такие же частотный предел и длину “мертвой зоны” имеет диод с антизапорным металлическим катодным контактом [2]. Для увеличения предельной частоты генерации создают различные типы катодных контактов, которые обеспечивают высокую напряженность электрического поля у катода и значительно уменьшают длину “мертвой зоны”. К таким типам катодных контактов относятся: катод с высокоомной неоднородностью (“зарубкой”)  $n^+ - n^- - n$  (частотный предел работы  $\sim 250$  ГГц) [3, 4], двухзонный катод  $n^+ - n^- - n^+ - n$  (частотный предел  $\sim 280$  ГГц) [5], металлический запорный катодный контакт  $m - n$  (частотный предел  $\sim 100$  ГГц) [6, 7], запорный гетеропереход на катоде (частотный предел  $\sim 160$  ГГц) [8].

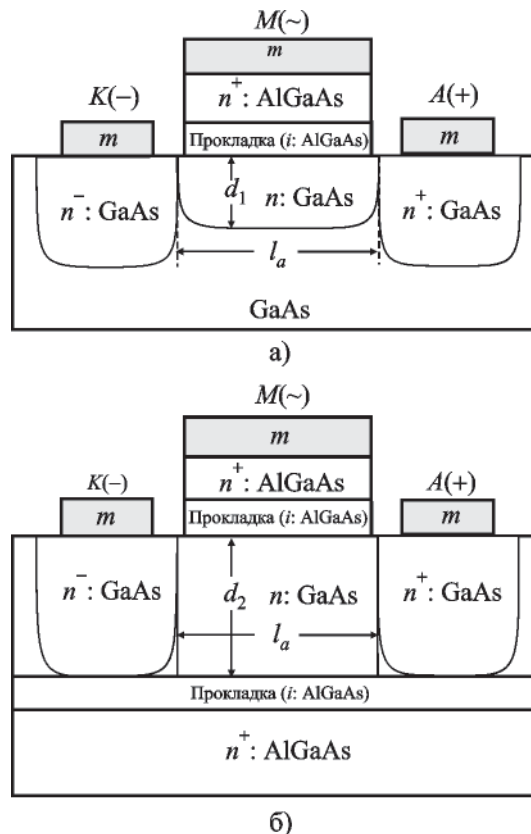
Другая возможность увеличить эффективность и частотный предел генерации диодов Ганна заключается в сочетании междолинного переноса электронов (МПЭ) с модуляцией проводимости активной области диода [9-11]. В [11] для управления проводимостью активной области диода использовалась туннельная инжекция электронов из катодного контакта через  $p^{++} - n^{++}$ -переход. Такие диоды, как было показано в [11], обладают высоким частотным пределом генерации  $\sim 320$  ГГц. Однако модуляции подвергается только небольшая область вблизи катода, что явилось причиной низкой эффективности таких диодов ( $\sim 0.2$  % на частоте 180 ГГц).

В диодах с МПЭ самым медленным процессом, который определяет скорость работы прибора, является приобретение электронами энергии, достаточной для МПЭ ( $0.3 \div 0.5$  эВ для GaAs). При напряженности электрического поля  $3 \div 5$  кВ/см электроны, двигаясь без столкновений, приобретают эту энергию за  $2 \div 3$  пс [12], что составляет значительную часть периода колебания. На самом деле элек-

троны достигают таких значений энергии за значительно большее время из-за столкновений на центрах рассеяния. Существенный вклад в общее время релаксации электронов по импульсу вносит рассеяние на ионизированных примесях. Оно уменьшает подвижность электронов как в центральной, так и в боковых долинах зоны проводимости. Низкая подвижность электронов отрицательно сказывается на выходных характеристиках диода. Анализ зависимости дрейфовой скорости электронов от электрического поля  $V(E)$  показывает, что увеличение концентрации ионизированных примесей приводит к уменьшению минимальной  $V_{\min}$ , максимальной  $V_{\max}$  дрейфовых скоростей электронов, а также их отношения  $V_{\max}/V_{\min}$ . При этом пороговое поле и время релаксации электронов возрастает.

Для увеличения эффективности, выходной мощности и частотного предела генерации

диода Ганна необходимо создать структуру, в которой не было бы ионизированных примесей, но сохранялась бы высокая концентрация электронов, достаточная для зарождения доменов сильного поля [13]. Это можно сделать с помощью одного или двух гетеропереходов с селективным легированием [14] при соответствующей толщине канала  $d_1$  или  $d_2$  [13] (рис. 1). Диод с модулирующим электродом представляет собой структуру, показанную на рис. 1, а. Диод изготавливается на основе эпитаксиальной структуры: слой чистого GaAs с концентрацией остаточных примесей менее  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, слой нелегированного Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (концентрация доноров менее  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, прокладка) и слой легированного Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с концентрацией доноров  $10^{18} \div 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Активная область представляет собой индуцированный слой в GaAs вблизи границы гетероперехода. Протяженность



**Рис. 1.** Схематическое изображение диода Ганна и распределение концентрации электронов в нем: а) с одним гетеропереходом, б) с двумя гетеропереходами

модулирующего электрода соответствует длине активной области диода  $l_a$ . После создания модулирующего электрода область  $n^+$ :  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и область  $i$ :  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  удаляются, и на GaAs с помощью металлов или сплавов создают анод и катод. Катод представляет собой запорный контакт металл-полупроводник (работа выхода электронов из металла больше, чем из полупроводника  $\phi_m > \phi_n$ ), анод – антизапорный контакт ( $\phi_m < \phi_n$ ). В результате у анода образуется обогащенная электронами область ( $n^+$  на рис. 1, а, б), у катода – обедненная электронами область ( $n^-$  на рис. 1, а, б). Катод и анод контактируют с индуцированным каналом, в котором подвижность и концентрация электронов ( $n$  – средняя по ширине канала концентрация) достаточно высоки. Большая подвижность определяется низкой концентрацией примесей ( $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Область пространственного заряда индуцированного канала составляет  $d_1 \sim 0.2 \div 0.3 \text{ мкм}$ . Условие  $nd_1 > 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , необходимое для работы диода, в таком канале выполняется. Тем более оно выполняется при двойном гетеропереходе (рис. 1, б). Области пространственного заряда катода и гетероперехода перекрываются, в результате в индуцированном канале у катода возникает область с пониженной концентрацией электронов, (подобие “зарубки”), что обеспечивает необходимые условия для образования доменов сильного поля. Использование индуцированного канала в качестве активной области диода уменьшает рассеяние электронов на ионизированных примесях и улучшает энергетические характеристики генераторов на основе таких диодов.

Если в исследуемом диоде создать переменное электрическое поле, перпендикулярное индуцированному каналу, то можно изменять проводимость активной области диода. При модуляции с частотой работы диода на модулирующий электрод подается то же напряжение, что и на диод, или пропорциональное ему. Это напряжение может подаваться со сдвигом по фазе или без сдвига (модулирующий электрод может быть соединен непосредственно с анодом или катодом либо через реактивный элемент).

В настоящей работе проводилось математическое моделирование диода Ганна субмикронной длины на основе GaAs с индуцированным

каналом в активной области (рис. 1). Исследовались выходные характеристики диода и основные физические явления, происходящие в нем.

### Методика исследования и параметры диода

Для полного описания предлагаемой структуры диода необходимо, чтобы математическая модель диода учитывала все основные процессы, влияющие на МПЭ в двух перпендикулярных направлениях. Таким образом, необходимо рассматривать сложную двухмерную задачу. Целью нашего исследования является получение оценочных результатов для выяснения перспективности предлагаемого диода Ганна. Поэтому задача была упрощена следующим образом:

- 1) не учитываются поля, действующие перпендикулярно каналу (одномерная модель);
- 2) не учитывается заряд электронов в индуцированном канале;
- 3) распределение носителей заряда в канале считается однородным (в большей мере это соответствует диоду с двумя гетеропереходами);
- 4) толщина канала в структуре с одним гетеропереходом AlGaAs/GaAs не меняется по длине канала при приложении напряжения к управляющему электроду (в структуре с двумя гетеропереходами это более справедливо).

Таким образом, рассматривалась одномерная модель – диод с высокоомной областью у катода (“зарубкой”) [3, 4] и активной областью с высокой концентрацией электронов, без учета их рассеяния на ионизированных примесях. Для решения задачи была выбрана хорошо апробированная двухтемпературная модель [3] с методикой решения, предложенной в [4]. В модели пренебрегается теплопроводностью электронного газа и изменением средней скорости электронов во времени [3]. Последнее строго обосновано лишь в том случае, когда характерная частота процессов  $f$  много меньше средних частот релаксации по импульсу. Отличительной особенностью исследуемого диода является отсутствие ионизированных примесей и модуляция проводимости активной области диода. Необходимо учитывать, что

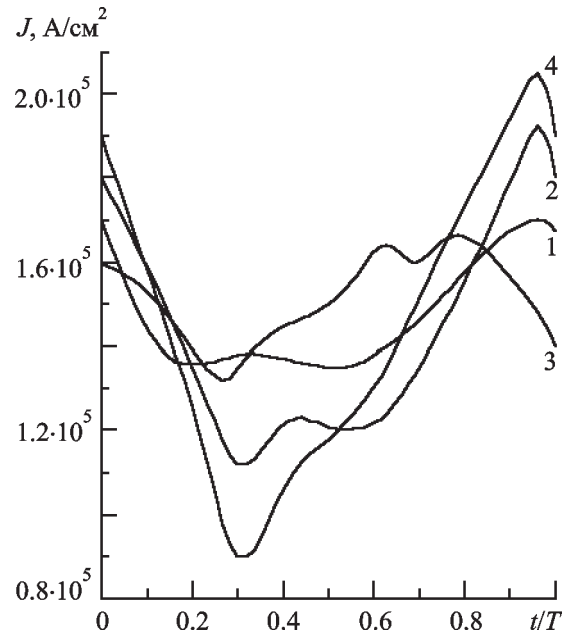
отсутствие ионизированных примесей приводит к уменьшению частоты релаксации по импульсу. В настоящем исследовании наибольшая из рассматриваемых частот составила 240 ГГц, что почти в 10 раз меньше минимальной частоты релаксации по импульсу в  $n$ -GaAs с константой междолинного взаимодействия  $D_{ГХ} = 8 \cdot 10^8$  эВ/см. Модуляция проводимости осуществлялась путем изменения концентрации электронов:  $n(x, t) = n + n_m \sin(2\pi ft + \varphi)$ , где  $n_0$  и  $n_m$  – соответственно постоянная составляющая и амплитуда колебания концентрации электронов в активной области диода. Колебания концентрации электронов совершаются с той же частотой, что и колебание напряжения на диоде [4], но с некоторым фазовым сдвигом  $\varphi$ . Длина активной области диода составляет 0.5 мкм. Концентрация электронов в ней  $n = 5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  и  $n_m = 10^{15}$  см $^{-3}$ . Необходимые для расчетов параметры GaAs были взяты из [4, 9].

На диод подавалось синусоидальное напряжение [4], что соответствует помещению диода в одноконтурный резонатор. Исследования проводились на основной гармонике при постоянной температуре кристаллической решетки 300 К.

### Энергетические и частотные характеристики

Исследования показали, что в диоде с “зарубкой” как с ионизированными примесями, так и без них возникают дипольные домены. На зависимости плотности тока от времени (рис. 2) существует область дрейфа формирующегося домена (участок с током малой величины). Оптимальная генерация колебаний тока в диоде с ионизированными примесями получена на частоте  $\sim 170$  ГГц с эффективностью (КПД)  $\eta \sim 0.6\%$  (рис. 3).

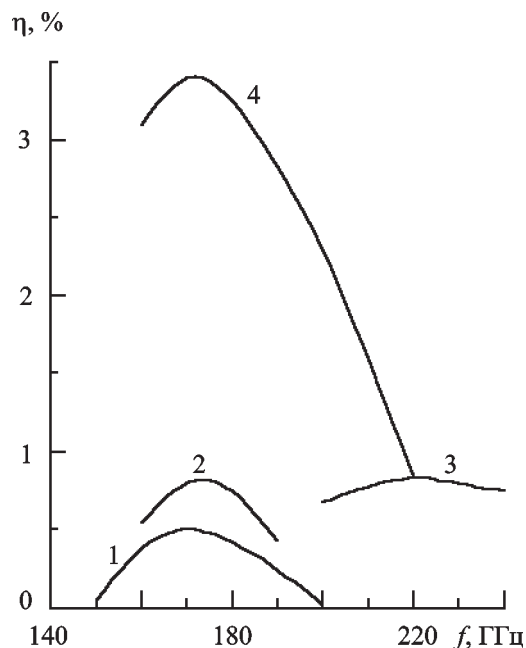
Если сравнивать характеристики диодов с ионизированными примесями и без них, можно выделить следующие различия. Амплитуда колебания тока во втором случае больше. Это происходит из-за того, что в отсутствие ионизированных примесей возрастает отношение  $V_{\max}/V_{\min}$  на зависимости  $V(E)$  и увеличива-



**Рис. 2.** Зависимость средней плотности тока в диоде от времени, нормированного на период колебания:

- 1 – диод с ионизированными примесями ( $f = 170$  ГГц);
- 2 – диод без ионизированных примесей ( $f = 180$  ГГц);
- 3 – диод без ионизированных примесей и с колебанием концентрации электронов в активной области при  $\varphi = 0$  ( $f = 220$  ГГц);
- 4 – диод без ионизированных примесей и с колебанием концентрации электронов в активной области при  $\varphi = -\pi/4$  ( $f = 130$  ГГц)

ется концентрация электронов в боковой долине зоны проводимости в моменты времени от  $T/4$  до  $3T/4$ . Последнее обстоятельство приводит к тому, что минимальный ток в диоде без примесей меньше, чем в диоде с примесями (рис. 2, кривые 1 и 2). При этом  $V_{\min}$ , наоборот, больше. Также изменяются форма колебаний и соотношение фаз между колебаниями плотности тока и напряжения в диоде. Фазовые соотношения между колебаниями тока и напряжения становятся более эффективны для генерации. Разность фаз между колебаниями напряжения и плотности тока в диоде смещается к  $\pi/2$ . Увеличение подвижности электронов в диоде без примесей приводит к уменьшению времени формирования



**Рис. 3.** Зависимость эффективности генерации от частоты:

- 1 – диод с ионизированными примесями;
- 2 – диод без ионизированных примесей;
- 3 – диод без ионизированных примесей и с колебанием концентрации электронов в активной области при  $\varphi = 0$ ;
- 4 – диод без ионизированных примесей и с колебанием концентрации электронов в активной области при  $\varphi = -\pi/4$

и увеличению скорости распространения (за счет возрастания  $V_{\min}$ ) дипольных доменов, что влияет на частотные свойства диода. Оптимальная частота генерации составляет  $\sim 180$  ГГц с КПД  $\sim 1\%$  (рис. 3).

Модуляция концентрации электронов в активной области в диоде без примесей приводит к изменениям энергетических и частотных характеристик диода. Амплитуда колебания концентрации электронов составляла  $\sim 10^{15}$  см $^{-3}$  ( $\sim 3\%$  от  $n_0$ ). Но даже такая небольшая амплитуда  $n_m$  приводит к значительным изменениям выходных характеристик (рис. 3). При модуляции без фазового сдвига,  $\varphi = 0$ , увеличиваются оптимальная частота и ширина частотного диапазона генерации диода. Это происходит вследствие улучшения фазовых характеристик колебаний тока. Эффективность

генерации практически не изменяется. Модуляция без фазового сдвига приводит к уменьшению амплитуды и улучшению фазы колебаний плотности тока в диоде (рис. 2, кривая 3). Поэтому при неизменном КПД увеличивается оптимальная частота генерации. Оптимальный режим генерации колебаний тока в диоде получен на частоте  $\sim 220$  ГГц с КПД  $\sim 0.8\%$ .

При модуляции с задержкой  $\varphi = -\pi/4$  дополнительные электроны значительно увеличивают амплитуду колебания плотности тока в диоде. Фаза колебаний тока остается такой же, как в диоде без модуляции (рис. 2, кривая 4). Следовательно, возрастает эффективность генерации, а оптимальная частота генерации остается практически неизменной. Оптимальный режим генерации получен на частоте  $\sim 175$  ГГц с КПД  $\sim 3.4\%$  (рис. 3, кривая 4). Увеличение ширины частотного диапазона в рассмотренных диодах связано с возрастанием КПД.

## Выводы

1. В субмикронном диоде Ганна без ионизированных примесей в активной области возникают колебания тока, связанные с распространением дипольных доменов. Отсутствие ионизированных примесей в диоде увеличивает амплитуду колебаний тока и улучшает фазовые характеристики. Возрастает КПД и оптимальная частота генерации, которые составляют  $\sim 1\%$  и 180 ГГц соответственно.

2. Модуляция проводимости без фазового сдвига,  $\varphi = 0$ , приводит к увеличению разности фаз между колебаниями тока и напряжения без изменения амплитуды колебания тока в диоде. Происходит возрастание оптимальной частоты генерации без изменения КПД.

3. Модуляция проводимости с задержкой  $\varphi = -\pi/4$ , наоборот, приводит к росту амплитуды колебания тока в диоде, а разность фаз между колебаниями тока и напряжения не изменяется. В результате КПД становится больше, а оптимальная частота остается неизменной.

Таким образом, отсутствие ионизированных примесей и модуляция проводимости активной области диодов Ганна позволяет уве-

личить эффективность и ширину частотного диапазона генераторов на диодах Ганна. Полученные результаты говорят о перспективности дальнейшего исследования работы диодов Ганна с индуцированным каналом.

### Литература

1. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, П. И. Сидокур. Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника 1987, №307, с. 16-19.
2. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1988, **33**, №6, с. 1336-1337.
3. В. И. Голант, А. А. Кальфа, С. Б. Пореш, А. С. Тагер. Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1981, №7, с. 23-28.
4. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1987, **32**, №9, с. 1947-1954.
5. А. А. Кальфа, А. С. Тагер. Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1982, Вып. 10, с. 17-21.
6. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1988, **33**, №6, с. 1295-1301.
7. В. Е. Чайка, Н. В. Жембровская. Украинский физический журнал. 1982, №5, с. 732-737.
8. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Радиотехника и электроника. 2000, **45**, №4, с. 508-510.
9. Э. Д. Прохоров, Н. И. Белецкий. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов. Харьков, Вища школа, из-во при Харьковском университете, 1982, 144 с.
10. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров. Труды межведомственной научно-технической конференции "Приборы, техника и распространение мм, субмм волн". Харьков, 1992, с. 37.
11. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Радиофизика и радиоастрономия. 1998, **3**, №4, с. 419-423.
12. А. Матуленис, Ю. Пожела, А. Реклайтис. Динамика разогрева электронов. В сб.: Электроны в полупроводниках. Т. 1. Многодолинные полупроводники. 1978.
13. М. Е. Левинштэйн, Ю. К. Пожела, М. С. Шур. Эффект Ганна. Москва, Советское радио, 1975, 288 с.
14. А. А. Кальфа, А. С. Тагер. Гетероструктуры с селективным легированием. Многослойные полупроводниковые структуры и сверхрешетки. Горький, из-во при Институте прикладной физики АН СССР, 1984, 230 с.
15. Н. Sakaky. Jap. J. Appl. Phys. Lett. 1982, **21**, No. 6, pp. L381-L383.

### **Gunn Diode with Induced Channel in Active Region**

**Yu. V. Arkusha, E. D. Prokhorov,  
I. P. Storozhenko**

The theoretical investigation results of the submicron Gunn diode performance having the active region without the ionized impurities and with modulation of conductivity in active region are presented. It is shown that the modulation of conductivity and absence of the ionized impurities in the diode active region increases its efficiency, frequency range width and the optimum frequency of generation.