

Влияние металлического контакта к запорному $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$ -гетерокатоду на работу GaAs -диодов Ганна

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

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
61077, Харьков, пл. Свободы 4
E-mail: fizika@ukrfa.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 26 марта 2004 г.

Рассчитана частотная зависимость эффективности генерации $m-n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-n:\text{GaAs}-n^+:\text{GaAs}$ -диодов Ганна с длиной активной области 2.5 мкм. Определены оптимальные значения длины $n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катода, концентрации ионизированных примесей в нем и высоты потенциального барьера на металлическом контакте, при которых эффективность генерации максимальна.

Розраховано частотну залежність ефективності генерації $m-n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-n:\text{GaAs}-n^+:\text{GaAs}$ -діодів Ганна з довжиною активної області 2.5 мкм. Визначено оптимальні значення довжини $n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катода, концентрації іонізованих домішок у ньому та висоти потенційного бар'єра на металевому контакті, за яких ефективність генерації максимальна.

Введение

В диодах Ганна для генерации электромагнитных колебаний мм диапазона используют сложные катодные контакты, с помощью которых удается уменьшить длину зоны начального разогрева электронов и тем самым увеличить предельный уровень частот генерации. Одним из таких катодных контактов является гетеропереход (гетерокатод) [1, 2]. Диоды с запорным изотипным гетерокатодом обладают рядом положительных особенностей. Во-первых, из-за большого поля на гетеропереходе создаются условия для формирования дипольных доменов. Благодаря формированию дипольных доменов повышается эффективность и частотный предел генерации электромагнитных колебаний такими диодами. Во вторых, диоды с гетерокатодом имеют большую термостабильность, что является крайне важным для генерации электромагнитных колебаний в непрерывном режиме [3]. Однако выходные характеристики таких

диодов крайне чувствительны к электрофизическим параметрам гетерокатода. В работе [1] отмечается, что даже небольшое изменение скорости междолинного переноса электронов (МПЭ) в гетерокатоде заметно влияет на выходные характеристики всего диода. Выходные характеристики диодов с гетерокатодом зависят от концентрации ионизированных примесей, длины катодной области и вещества катода. В работах [1, 3] рассматривались диоды с идеальным омическим контактом к гетерокатоду, тогда как в реальных диодах контакт металлический.

Целью настоящей работы является определение влияния металлического контакта к гетерокатоду, концентрации ионизированных примесей и длины катодной области на эффективность генерации диодов с запорным гетерокатодом. Проводятся исследования основных физических явлений, связанных с МПЭ в $m-n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-n:\text{GaAs}-n^+:\text{GaAs}$ -диоде.

Методика исследования

Для изучения работы диодов применяется двухтемпературная модель, которая учитывает инерционность МПЭ и различие температуры электронов в Γ -долине и одной из боковых долин – X или L . Система уравнений двухтемпературной модели состоит из уравнений непрерывности, плотности тока и баланса энергии для каждой из долин зоны проводимости, а также уравнения Пуассона для электрического поля. Эта модель неоднократно использовалась при исследовании диодов Ганна. Подробнее о двухтемпературной модели можно узнать, например, в работе [4]. Металлический контакт в модели учитывается с помощью граничных условий для концентрации электронов и электрического поля в Γ -долине, как это делалось в работах [5, 6]. Учет гетероперехода в модели сводится к учету его внутреннего электрического поля. В области гетероперехода в уравнениях плотности тока и баланса энергии присутствуют дополнительные слагаемые, связанные с разрывом зоны проводимости [1]. Система уравнений двухтемпературной модели решается с помощью метода прогонки [4]. Модель имеет ограничения по исследуемым частотам. Характерная частота исследуемых процессов должна быть много меньше средних частот релаксации электронов по импульсу, которые составляют в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ~ 5 ТГц.

В настоящей работе рассматривается Γ - L -модель $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. В численных расчетах использованы следующие исходные данные. Параметры полупроводников взяты из работы [1]. Температура кристаллической решетки считалась постоянной и равной 300 К. Общая длина диода L и длина n :GaAs активной области l_a равны соответственно 3.2 и 2.5 мкм. Длина n : $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ области (катода) l_k варьировалась в пределах от 0.2 до 0.5 мкм. Концентрация ионизированных примесей в активной области $N_a = 10^{16}$ см⁻³, а в аноде – $8 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Концентрация ионизированных примесей в катоде N_k менялась от $0.8 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Изменялась также высота потенциального барьера контакта металл-полупроводник ϕ_m . Рассматривались запорный ($\phi_m > 0$) и антизапорный ($\phi_m < 0$) металлические контакты. Разрыв зоны проводимости в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs-гетеропереходе при одинаковом уровне легирования в областях и в зависимости от состава $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ определялся из соотношения: $\Delta E_c = 0.83x$. На диод подавалось синусоидальное напряжение с частотой f и постоянное напряжение U_0 , что соответствует помещению диода в одноконтурный резонатор. Все приведенные выходные характеристики оптимизированы по амплитуде, постоянной составляющей и частоте колебания напряжения. Диоды исследуются в пролетном режиме работы. Эффективность генерации, с целью исключения переходных процессов, вычислялась для второго периода колебаний.

Результаты исследования

Влияние концентрации ионизированных примесей в гетерокатоде. В гетеропереходе за счет разности энергии электронного сродства полупроводников возникает поток электронов, что приводит к перераспределению концентрации электронов в области контакта полупроводников. Равновесие наступает при равенстве суммы диффузионной и дрейфовой составляющих плотностей тока плотности тока, возникающей из-за разности энергии электронного сродства полупроводников. В результате, в катоде ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слое) возникает обогащенная, а в активной зоне (GaAs-слое) обедненная электронами область, т. е. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs-гетеропереход является запорным контактом. В зависимости от концентрации ионизированных примесей в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слое изменяются ширина области пространственного заряда гетероперехода, распределения концентрации электронов и электрического поля в окрестности гетероперехода. Все это влияет на МПЭ как в гетеропереходе, так и в активной области. Следовательно, концентрация ионизированных примесей в катоде способ-

на оказывать влияние на условия формирования дипольного домена и в конечном итоге на выходные характеристики всего диода. Исследования показали, что существует оптимальный уровень легирования полупроводника в катоде, при котором эффективность генерации максимальна. Для диодов с заборным гетерокатодом и идеальным омическим контактом ($\phi_m \sim 0$) максимальное значение эффективности генерации достигается при приблизительном равенстве концентраций ионизированных примесей в катоде, и активной области, $N_k \approx N_a$. Оптимальный уровень легирования обусловлен оптимальным соотношением между значениями электрического поля на гетеропереходе и концентрации электронов в обедненной области гетероперехода, а также уровнем заселенности электронами боковых долин в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слое [7].

В работе [1] было показано, что эффективность генерации диода с гетерокатодом зависит от заселенности электронами боковых долин катода, которая определяется концентрацией ионизированных примесей. Средняя температура электронов Γ -долины в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слое вне области пространственного заряда гетероперехода приблизительно одинакова и близка к температуре кристаллической решетки. Поэтому с увеличением концентрации ионизированных примесей увеличивается концентрация электронов в боковых долинах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя и улучшаются условия формирования дипольных доменов на гетеропереходе [1]. Однако, с другой стороны, увеличение ионизированных примесей в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слое влечет за собой рост потенциального барьера в гетеропереходе. В результате возрастает максимальное электрическое поле и уменьшается суммарная концентрация электронов в долинах зоны проводимости в обедненной области гетероперехода (т. е. в GaAs активной области). Рост электрического поля приводит к увеличению относительной концентрации электронов в боковых долинах гетероперехода, но суммарная концентрация электронов в обедненной области гетероперехода при этом уменьшается.

В итоге условия формирования дипольных доменов становятся хуже и эффективность генерации падает (см. рис. 1).

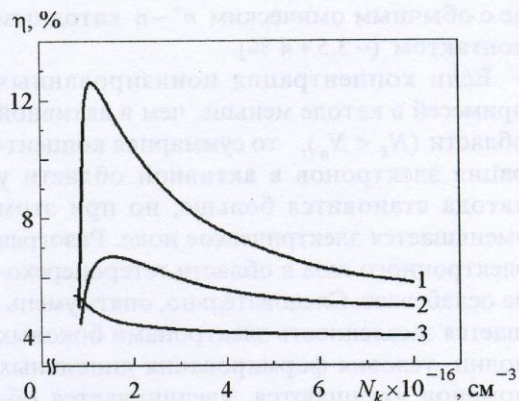


Рис. 1. Зависимость эффективности генерации GaAs-диодов от уровня легирования $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катода:

1 – $\text{In}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$; 2 – $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{As}$;
3 – $\text{In}_{0,20}\text{Ga}_{0,80}\text{As}$

Если концентрация ионизированных примесей в катоде больше оптимального значения, то заметного ($\geq 2\%$) изменения в оптимальном составе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ не происходит. Эффективность генерации и выходная мощность достигают своих максимальных значений, если процентная доля InAs в соединении $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ равняется 45%. При значительном увеличении концентрации N_k (более чем в 10 раз) ее влияние на формирование дипольных доменов ослабляется, т. е. зависимость эффективности генерации от концентрации ионизированных примесей в катоде становится более пологой. Дальнейшее увеличение N_k должно привести к тому, что диффузионный ток на $n^+ - n$ -гетерокатоде будет значительно превосходить ток, возникающий из-за разности энергии электронного сродства в полупроводниках. Таким образом, влияние гетерокатода на работу диода при больших значениях N_k ослабевает. Состав

полупроводника в катоде почти не влияет на МПЭ в диоде и его выходные характеристики. Эффективность генерации в области высоких значений N_k постоянна, $\sim 4 \div 5 \%$, что несколько выше, чем в диоде с обычным омическим $n^+ - n$ катодным контактом ($\sim 3.5 \div 4 \%$).

Если концентрация ионизированных примесей в катоде меньше, чем в активной области ($N_k < N_a$), то суммарная концентрация электронов в активной области у катода становится больше, но при этом уменьшается электрическое поле. Разогрев электронного газа в области гетероперехода ослабевает. Следовательно, опять уменьшается заселенность электронами боковых долин, условия формирования дипольных доменов ухудшаются, увеличивается область начального разогрева электронов, падают выходная мощность и эффективность генерации (рис. 1). Следует отметить, что для случая $N_k < N_a$ оптимальный состав полупроводника в катоде изменяется. Чем меньше N_k , тем меньше оптимальная процентная доля InAs в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (рис. 1). Кроме того, при $N_k < N_a$ существует еще одна особенность. В этом случае электрическое поле на гетеропереходе становится меньше. Однако увеличивается падение напряжения на самом $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слое. Следовательно, можно предположить, что значительное уменьшение N_k (в ~ 10 раз и более) должно привести к случаю диода с высокоомной неоднородностью у катода. При этом следует ожидать отсутствия зависимости эффективности генерации от состава соединения $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Влияние высоты барьера на контакте металл-полупроводник. Рассматриваются диоды, у которых длина катода l_k равняется 0.38 мкм . Металлический контакт к $n\text{:In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -области с малым барьером не приводит к значительному изменению распределения концентрации электронов в гетеропереходе и активной области. Области пространственного заряда металлического контакта и $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -GaAs-гетероперехода не перекрываются. Основные

процессы, протекающие в диоде, остаются такими же, как в случае с идеальным омическим контактом. А именно, в диоде с запорным гетерокатодом формируются и распространяются дипольные домены. Однако те изменения в распределении концентрации электронов возле гетероперехода, которые вносит металлический контакт, влияют на формирование и распространение дипольных доменов в активной области диода.

Запорный металлический контакт ($\varphi_m > 0$) создает в $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -области обедненный электронами слой. Поэтому возрастание потенциального барьера на запорном металлическом контакте приводит к росту электрического поля в катоде и уменьшению суммарной концентрации электронов в центральной и в боковых долинах зоны проводимости. Чем выше потенциальный барьер, тем при больших значениях питающего напряжения U_0 происходит генерация колебаний тока. При этом уменьшаются амплитуда колебаний тока и ее постоянная составляющая, а также становится меньше разность фаз между колебаниями напряжения и плотности тока в диоде. В совокупности эти причины приводят к падению выходной мощности и эффективности генерации. Следует также отметить, что при значениях барьера на металлическом контакте, больших, чем 0.02 эВ , происходит стабилизация эффективности генерации на уровне $\sim 0.8 \div 0.9 \%$. Дело в том, что электрическое поле на металлическом контакте при этих значениях барьера превышает электрическое поле гетероперехода. В GaAs-диоде с $m - n\text{:In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -катодом при достаточной длине $n\text{:In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -области ($\geq 0.8 \text{ мкм}$) дипольные домены образуются в $n\text{:In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -слое на металлическом контакте [8].

Антизапорный металлический контакт ($\varphi_m < 0$) создает в полупроводнике обогащенный электронами слой. В результате электрическое поле в катоде уменьшается, а суммарная концентрация электронов в двух долинах в области металлического контакта возрастает. Электрические поля на металлическом контакте и гетеропереходе имеют

противоположное направление. В связи с тем что на достаточно короткой длине $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -области (0.38 мкм) электрическое поле меняет направление, заселенность электронами боковых долин в ней незначительная. Низкая концентрация электронов в боковых долинах в окрестности гетероперехода сказывается отрицательно на формировании дипольных доменов, максимальное значение поля домена уменьшается, разность фаз между колебаниями напряжения и плотности тока становится меньше. При этом амплитуда колебаний тока и ее постоянная составляющая в диоде возрастают, питающее напряжение падает. Эффективность генерации такого диода при увеличении высоты потенциального барьера падает (см. рис. 2). В случае больших барьеров антизапорного металлического контакта электрическое поле на гетеропереходе будет уменьшаться, а область начального разогрева электронов увеличиваться. Поэтому следует ожидать, что эффективность генерации этих диодов будет такой же, как у диодов с обычным омическим $n^+ - n$ катодным контактом, хотя в отличие от запиорного металлического контакта с большим потенциальным барьером дипольные домены по-прежнему будут формироваться на гетеропереходе.

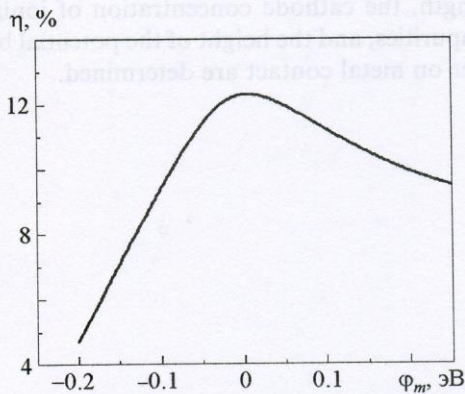


Рис. 2. Зависимость эффективности генерации GaAs-диодов от высоты потенциального барьера на контакте $m-n:\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$

Влияние длины гетерокатода. В результате исследования было определено, что существует оптимальная длина катодной области, при которой достигается наилучшее соотношение между амплитудой колебаний тока, ее постоянной составляющей и разностью фаз между колебаниями напряжения и тока. При длине катода меньше оптимальной эффективность генерации уменьшается (см. рис. 3) вследствие уменьшения разности фаз между колебаниями тока и напряжения и увеличения постоянной составляющей тока. При длине катода больше оптимальной уменьшение эффективности генерации происходит из-за уменьшения амплитуды колебаний тока. Зависимости оптимальной длины катода от высоты барьера на металлическом контакте обнаружено не было.

К сожалению, экспериментальных работ по данной тематике крайне мало, причем влияние электрофизических параметров катода на выходные характеристики диода остается неисследованным. В связи с этим сравнение результатов расчета с экспериментом крайне затруднительно. Однако можно отметить, что в экспериментальных работах наибольшую эффективность генерации и выходную мощность имели диоды, у которых концентрация

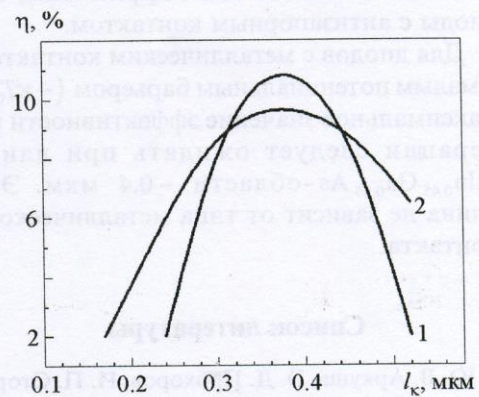


Рис. 3. Зависимость эффективности генерации GaAs-диодов от длины $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -катода: 1 - $\phi_m = 0.02$ эВ; 2 - $\phi_m = -0.01$ эВ

ионизированных примесей в катоде была приблизительно такой же, как в активной области [2, 9].

Заключение

Проведенные исследования особенностей генерации СВЧ колебаний с помощью $m-n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-n:\text{GaAs}-n^+:\text{GaAs}$ -диодов, работающих на эффекте МПЭ с длиной активной области 2.5 мкм, дали возможность установить следующее.

Даже незначительные изменения в распределении концентрации электронов в окрестности гетерокатода приводят к изменению выходных характеристик всего диода.

Наибольшие значения эффективности генерации следует ожидать при приблизительно одинаковой концентрации ионизированных примесей в $n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -катоде и активной $n:\text{GaAs}$ -области.

Металлический контакт к GaAs-диоду с коротким $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -катодом уменьшает эффективность генерации по сравнению с идеальным омическим контактом. При этом антизапорный металлический контакт увеличивает амплитуду колебаний тока и уменьшает питающее напряжение, а запорный контакт, наоборот, уменьшает амплитуду колебаний тока и увеличивает питающее напряжение. Диоды с запорным металлическим контактом более эффективны, чем диоды с антизапорным контактом.

Для диодов с металлическим контактом и малым потенциальным барьером ($\sim kT_0$), максимальное значение эффективности генерации следует ожидать при длине $n:\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -области ~ 0.4 мкм. Эта длина не зависит от типа металлического контакта.

Список литературы

1. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Радиотехника и электроника. 2000, **45**, № 4, с. 508-510.
2. N. R. Couch, P. H. Beton, M. J. Kelly, M. M. Kerr. Solid State Electron. 1988, **31**, No. 3-4, pp. 4-2, 613-616.

3. Ю. В. Аркуша, Э. Д. Прохоров, И. П. Стороженко. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, **2**, № 2, с. 230-235.
4. В. И. Голант, А. А. Кальфа, С. Б. Пореш, А. С. Тагер. Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1981. № 7, с. 23-28.
5. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1988, **33**, № 6, с. 1295-1301.
6. Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров. Радиотехника и электроника. 1988, **33**, № 6, с. 1336-1337.
7. В. И. Каневский, Ю. Н. Козырев, Ю. Е. Сухина, Д. И. Побоккин. Радиотехника и электроника. 1995, **40**, №1, с. 147-153.
8. I. P. Storozhenko. Functional Materials. 1999, **6**, No. 4, с. 696-701.
9. N. R. Couch, H. Spomer, P. H. Beton. IEEE Electron Devices Lett. 1989, **10**, No. 7, pp. 288-290.

Effect of an $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$ Blocking Heterocathode Metal Contact on the GaAs TED Operation

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

The frequency dependence of the generation efficiency of an $m-n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-n:\text{GaAs}-n^+:\text{GaAs}$ TED with the 2.5- μm long active region is calculated. The optimum values – which yield the diode maximum generation efficiency – for the $n:\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ cathode length, the cathode concentration of ionized impurities, and the height of the potential barrier on metal contact are determined.

