

УДК 621.315.592

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОСИТЕЛЕЙ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СВЧ СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК

*А. М. Белянцев, В. А. Валов, М. Н. Дроздов, А. Л. Железняк,
В. А. Козлов, М. Л. Яковлев*

Экспериментально исследовано детектирование импульсного излучения на частоте 75 ГГц в неоднородных пленках n — GaAs. Показано, что при этом реализуется распределенный механизм нелинейности, обусловленный процессами перераспределения носителей между областями с различной подвижностью под действием силы Лоренца; установлено, что на частоте 75 ГГц инерционность этого механизма не проявляется. Проведенные исследования показали применимость этого механизма нелинейности для детектирования импульсного излучения 4-миллиметрового диапазона вплоть до падающей на детектор мощности порядка 1 кВт.

В работах [1–3] исследовалось пространственное перераспределение носителей тока и анизотропия проводимости в полупроводниковых пленках в скрещенных электрическом и магнитном полях, параллельных поверхности пленки. Интерес к этому явлению был вызван тем, что оно позволяет получать информацию о физических процессах и параметрах неоднородных структур. С другой стороны, при сильно неравновесном перераспределении носителей тока под действием силы Лоренца в пленке возникают ярко выраженные нелинейные гальваномагнитные свойства, которые нашли различные применения в полупроводниковых устройствах [4, 5]. Так, использование зависимости интегральной проводимости от магнитного поля в собственных полупроводниках, где неравновесное пространственное перераспределение выражено наиболее сильно, позволило создать магниторезистивные элементы нового типа, обладающие рекордной магниточувствительностью [4]. Однако применение их ограничено сравнительно низкочастотной областью $f \leq 10^5 \div 10^7$ Гц, поскольку в собственных полупроводниках инерционность перераспределения определяется либо характерным временем рекомбинации τ_r , либо временем поперечной диффузии τ_b .

Для повышения быстродействия в работах [6–8] предложено использовать монополярные пленки с неоднородным профилем подвижности, где характерные времена перераспределения значительно меньше $\tau^* \approx 10^{-11} \div 10^{-12}$ с и определяются временем максвелловской релаксации τ_M или временем релаксации импульса τ_p . Экспериментальное исследование инерционности установления перераспределения носителей и нелинейной высокочастотной проводимости неоднородных монополярных пленок на частотах до 37,5 ГГц проведено в работах [9, 10], при этом заметного проявления инерционности не было обнаружено. В работе [10] была продемонстрирована принципиальная возможность использования этого явления для СВЧ детектирования.

В данной работе исследован эффект детектирования мощного импульсного излучения на частоте 75 ГГц в неоднородных пленках n — GaAs и проведено сопоставление с результатами расчета, основанного на измерениях характеристик структур в постоянных полях, и теоретического расчета в гидродинамической модели. Установлена природа механизма выпрямления — поперечное перераспределение носителей в неоднородной пленке и продемонстрирована квазистационар-

ность нелинейной проводимости в этом диапазоне частот. Исследована вольт-ваттная чувствительность детектора импульсного излучения на основе неоднородной пленки n -GaAs в зависимости от уровня мощности.

Экспериментальное исследование ВАХ неоднородных пленок n -GaAs и детектирование СВЧ сигнала. Исследование гальваномагнитных эффектов в неоднородных пленках n -InSb, p -Ge, n -GaAs, проведенное в работе [11], показало, что наиболее сильное проявление нелинейных свойств реализуется в монополярных пленках с резким изменением, характерным для n^+ - n , p^+ - p -переходов, параметров по толщине. Для экспериментального исследования использовалась пленка n^+ - n -GaAs, выращенная методом жидкостной эпитаксии со следующими параметрами слоев: $\mu_1 = 8000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $d_1 = 60 \text{ мкм}$; $n_1 = 9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $\mu_2 = 1000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $d_2 = 15 \text{ мкм}$, $n_2 = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (при $T = 300 \text{ К}$).

Исследования показали, что нелинейные свойства ВАХ этой пленки наиболее сильно выражены при температуре решетки $T = 100 \div 120 \text{ К}$, в значительной степени они сохраняются и при температуре жидкого азота. На рис. 1 приведены ВАХ пленки при $T = 77 \text{ К}$ и значениях магнитного поля $B = 0, 10 \text{ кГс}$ — кривые 1, 2 (при этом магнитное поле параллельно поверхности пленки и перпендикулярно направлению тока). Характерной особенностью является возникновение невзаимной ВАХ диодного типа, смена знака магнитного поля приводит к характеристике, соответствующей противоположной полярности электрического поля, что связано с изменением знака силы Лоренца.

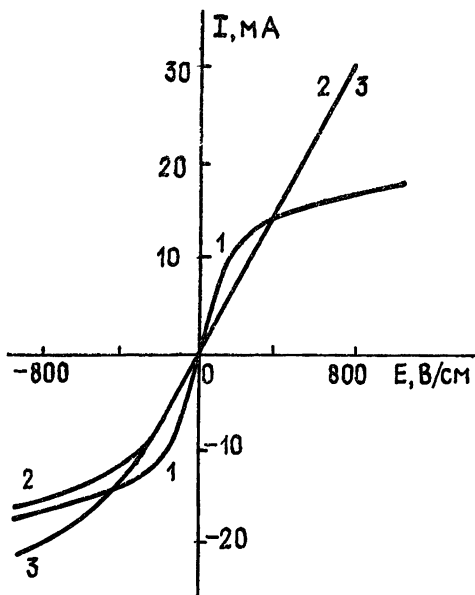


Рис. 1.

Рис. 1. ВАХ неоднородной пленки n -GaAs при $T = 77 \text{ К}$.

1 — $B = 0$; 2 — $B = 10 \text{ кГс}$; 3 — теоретическая кривая при $B = 10 \text{ кГс}$.

Рис. 2. Зависимость сопротивления пленки n -GaAs при $T = 77 \text{ К}$, $E = 600 \text{ В/см}$, $B = 3 \text{ кГс}$ от угла поворота в магнитном поле.

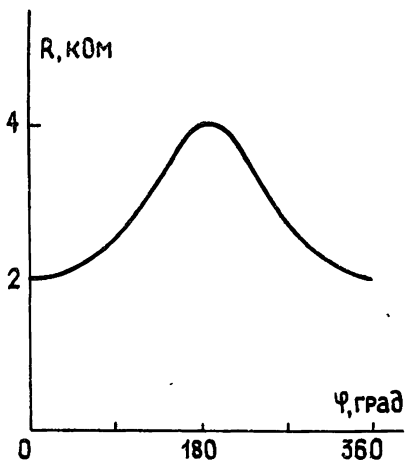


Рис. 2.

При $E \geq 0,5 \text{ кВ/см}$ заметное влияние оказывает разогрев электронов, приводящий к насыщению ВАХ в отсутствие магнитного поля [12]. При $B = 10 \text{ кГс}$ и $E > 0$ насыщение ВАХ отсутствует, поскольку наряду с насыщением дрейфовой скорости в слое с высокой подвижностью происходит и увеличение концентрации электронов в этом слое в результате их перераспределения под действием силы Лоренца.

На рис. 2 показана угловая зависимость сопротивления пленки при фиксированной величине E - и B -полей. Поворот образца в магнит-

ном поле приводит к изменению тангенциальной и нормальной компонент магнитного поля, действующего на образец, что изменяет и полный ток в структуре. Характерная величина угла, при повороте на который происходит заметное изменение тока, порядка 20° .

Экспериментальное исследование нелинейных высокочастотных свойств пленки n -GaAs проводилось на частоте 75 ГГц в импульсном режиме. Длительность импульса излучения составляла $\tau_{\text{и}}=20$ нс, мощность в импульсе — $P \leq 1$ кВт. Полупроводниковый образец, закрепленный на сапфировом диске, помещался в детекторную камеру, расположенную между полюсами электромагнита и охлаждаемую до температуры жидкого азота. Постоянное магнитное поле B было ориентировано параллельно поверхности пленки и перпендикулярно электрическому полю волны, распространяющейся в волноводном тракте. Возможная разориентация образца в $2-3^\circ$ относительно магнитного поля значительно меньше допустимой (см. рис. 2).

Результаты измерений вольт-ваттной чувствительности приведены на рис. 3, 4. Идентификация механизма выпрямления проводилась путем коммутации направления магнитного поля, среди возможных механизмов нелинейности в неоднородных пленках лишь в случае пространственного перераспределения носителей под действием силы Лоренца детектируемый сигнал будет менять знак. Полной симметрии кривых $U(P)$ при противоположных направлениях магнитного поля не достигается, кроме того, выпрямление наблюдается и в отсутствие магнитного поля (кривая 1, рис. 4). Эти данные свидетельствуют о наличии дополнительного механизма нелинейности, связанного с контактными явлениями*, однако в целом их роль оказывается незначительной и доминирующим является эффект выпрямления, обусловленный перераспределением носителей.

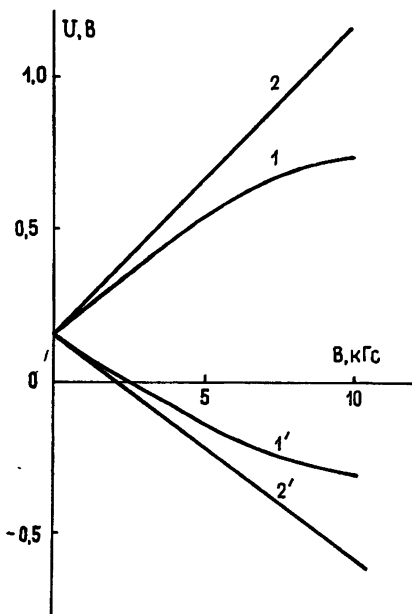


Рис. 3.

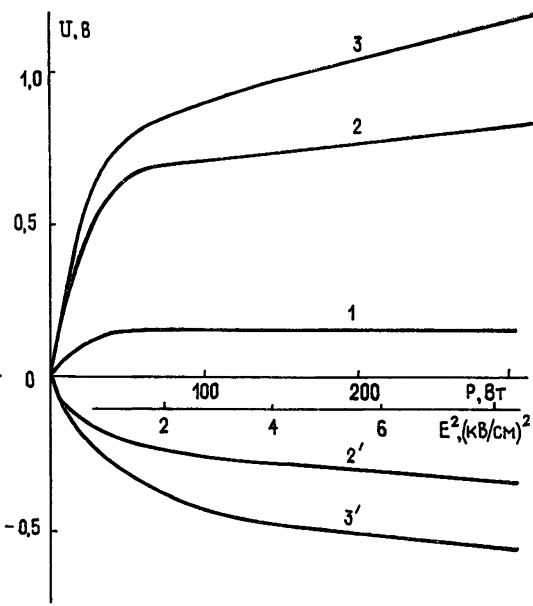


Рис. 4.

Рис. 3. Зависимость детектируемого напряжения на образце n -GaAs от магнитного поля при фиксированной мощности излучения ($T=77$ К):

1, 2 — $B > 0$; 1', 2' — $B < 0$; 1, 1' — $P = 40$ Вт; 2, 2' — $P = 300$ Вт.

Рис. 4. Зависимость U от мощности излучения ($T=77$ К):

1 — $B=0$; 2 — $B=6$ кГс; 3 — $B=10$ кГс; 2' — $B=-6$ кГс; 3' — $B=-10$ кГс.

На рис. 3 показана зависимость детектируемого напряжения U от магнитного поля при постоянном уровне падающей мощности. В исследованном диапазоне магнитных полей $B \leq 10$ кГс величина U линейно

* Подсветка приконтактных областей уменьшала влияние контактных явлений на эффект детектирования.

растет с ростом B . Зависимость U от мощности излучения при фиксированном магнитном поле носит более сложный характер (рис. 4). Наибольшее значение вольт-ваттной чувствительности $\beta \approx 25$ мВ/Вт при $B=10$ кГц достигается в диапазоне напряженности электрического поля волны $|E_{\sim}| \leq 1$ кВ/см, соответствующем мощности $P \leq 20$ Вт. Это значение вольт-ваттной чувствительности в 50 раз превышает чувствительность, реализованную в работе [10] в неоднородных пленках на частоте $f=37,5$ ГГц, и примерно в 25 раз — чувствительность детекторов высокого уровня мощности, основанных на эффекте разогрева [13].

При дальнейшем увеличении мощности падающего излучения вольт-ваттная чувствительность уменьшается. Как показывает исследование статических ВАХ, уменьшение β при $E \approx 0,5 \div 1,0$ кВ/см связано с разогревом электронов и насыщением их дрейфовой скорости в чистом слое n — GaAs, существенно изменяющим процессы перераспределения. Хотя линейный характер зависимости $U(P)$ наблюдался лишь в диапазоне мощности $1 \text{ Вт} < P < 20 \text{ Вт}$, устойчивая и воспроизводимая кривая зависимости $U(P)$ была получена во всем исследованном диапазоне $P \leq 1$ кВт. Возможность работы при больших уровнях мощности обусловлена распределенным характером детектирования.

Заметим, что при высоких уровнях мощности ($P \approx 100$ Вт) зависимость $U(P)$ близка к логарифмической. Хотя возможность абсолютной калибровки при этом утрачивается, использование детектора такой зависимостью в широком диапазоне мощности может представлять и определенные достоинства.

Сравнение теории с экспериментом. Для описания нелинейных гальваномагнитных явлений в неоднородных пленках n — GaAs в скрещенных E - и B -полях использовалась гидродинамическая модель, учитывающая реальные распределения концентрации ионизированных доноров и подвижности электронов по толщине пленки, снятые методом послойного стравливания. Уравнения, определяющие распределение концентрации электронов и полный ток в неоднородных структурах, обсуждались в работах [7, 8]. Решение этих уравнений для параметров, соответствующих рассматриваемым пленкам, вызывает значительные математические трудности из-за наличия малого параметра при старшей производной; метод решения этих уравнений для реальных параметров был разработан в [14, 15].

Результаты теоретического расчета ВАХ пленки n — GaAs и пространственного распределения электронов в постоянных полях приведены на рис. 1 (кривая 3) и рис. 5.

Достигнутое удовлетворительное совпадение теоретических расчетов с экспериментальными результатами (кривая 2, рис. 1) свидетельствует о том, что использованная модель перераспределения носителей [7, 8] достаточно полно отражает основные закономерности явлений переноса в неоднородных структурах. Различие кривых 2, 3 на рис. 1 связано,

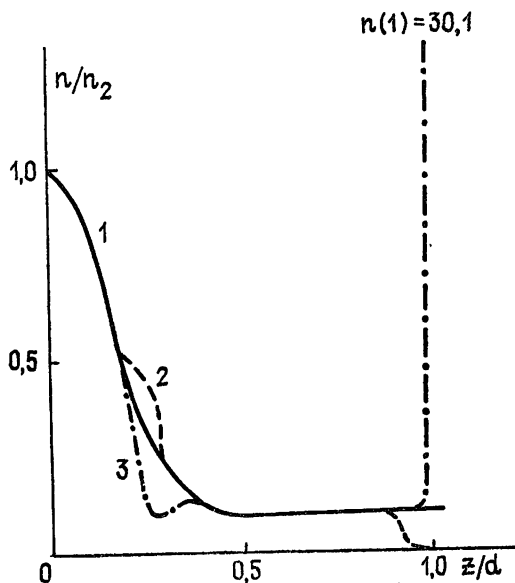


Рис. 5. Распределение концентрации носителей по толщине пленки при $T=77$ К, $E=700$ В/см:
1 — $B=0$; 2 — $B=10$ кГц; 3 — $B=-10$ кГц.

по-видимому, с разогревом электронов в электрическом поле, а также с энергетической зависимостью времени релаксации импульса, не учитываемыми при расчете.

На рис. 5 приведены профили неравновесного распределения электронов по толщине пленки n — GaAs при $B_0 = 10$ кГс, $E_0 = \pm 0,7$ кВ/см и температуре решетки $T = 77$ К. Кривые 2, 3 рис. 5 показывают, что при этих условиях в пленке происходит значительное отклонение концентрации электронов от равновесного распределения. При стягивании носителей в область с высокой подвижностью вблизи границы пленки возникает обогащенный слой (кривая 2), толщина которого оказывается меньше длины свободного пробега электронов в этой области. Это обстоятельство также не описывается использованной при расчете моделью; в области обогащения необходимо учитывать влияние поверхностного рассеяния на кинетику движения отдельных электронов в потенциальной яме, созданной силой Лоренца [16].

Расчет детектирования переменного электрического поля в неоднородных пленках проводился в приближении квазистационарности процессов перераспределения носителей. Согласно теоретическим расчетам, значение детектируемого напряжения при амплитуде переменного поля $E \sim 700$ В/см, $B_0 = 10$ кГс, $T = 77$ К равно $U^{(1)} \simeq 1,2 \div 1,7$ В. В соответствии с измерениями ВАХ в постоянных полях (рис. 1, кривая 2) величина детектируемого напряжения при этих значениях $E \sim$ и B_0 должна составлять $U^{(2)} \simeq 1,5 \div 3,0$ В. Высокочастотные измерения дают $U^{(3)} = 0,7$ В.

Совпадение теоретического значения $U^{(1)}$ и квазистатического $U^{(2)}$ с результатами высокочастотных измерений позволяет сделать вывод, что исследованный механизм нелинейности на частоте 75 ГГц определяется перераспределением носителей тока, причем инерционность этого механизма на данной частоте не проявляется. Постоянная времени детектирования составляла 10^{-8} с и определялась параметрами внешней регистрирующей цепи.

Проведенное исследование детектирования высокочастотного импульсного излучения показало, что в неоднородных пленках n — GaAs реализуется малоинерционный механизм нелинейности, обусловленный процессами перераспределения носителей между областями с различной подвижностью под действием силы Лоренца, не связанный с генерационно-рекомбинационными явлениями на поверхности или в объеме пленки. Экспериментально показана применимость этого механизма нелинейности для детектирования импульсного излучения на частоте 75 ГГц в интервале мощности $1 \text{ Вт} \leq P \leq 1 \text{ кВт}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рашба Э. И., Грибников З. С., Кравченко В. Я. // УФН. 1976. Т. 119. № 1. С. 3.
2. Кравченко А. Ф., Митин В. В., Скок Э. М. Явления переноса в полупроводниковых пленках. — Новосибирск: Наука, 1979. — 255 с.
3. Владимиров В. В., Волков А. Ф., Мейлихов Е. З. Плазма полупроводников. — М.: Атомиздат, 1979. — 256 с.
4. Левитас И., Пожела Ю., Сталерайтис К. // Сб. Электроны в полупроводниках. — Вильнюс: Мокслас, 1980. Т. 2. С. 73.
5. А. с. 460813 СССР. Магниторезистор / А. Матуленис, Ю. Пожела, В. Юцене и др. — Оpubл. в Б. И. 1978. № 24. С. 224.
6. Belyantsev A. M. et al. // Phys. Stat. Sol. (A). 1975. V. 28. P. 279.
7. Белянцев А. М., Валов В. А., Козлов В. А. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. № 2. С. 569.
8. Белянцев А. М., Валов В. А., Козлов В. А. // Радиофизика. 1977. Т. 20. № 4. С. 623 (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Качюлис С., Паршялюнас И., Тамулайтис Г., Цыпленков И. // Лит. физ. сб. 1983. Т. 23. № 3. С. 105.
10. Бочкарев С., Качюлис С., Матуленис А., Паршялюнас И. // Сб. II Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. — Харьков. 1978. Т. 1. С. 147.
11. Белянцев А. М., Козлов В. А., Мазов Л. С., Федоренко Е. Ф. // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 4. С. 655.

12. Конуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. — М.: Мир, 1970. — 384 с.
13. Денис В., Паужа А., Пожела Ю., Скучас Ю // Сб. Электроны в полупроводниках. — Вильнюс: Моклас, 1980. Т. 2. С. 9.
14. Белянцев А. М., Дроздов М. Н., Железняк А. Л. и др. // Сб. XII Совещание по теории полупроводников. — Киев, 1985. Ч. 2. С. 15.
15. Белянцев А. М., Железняк А. Л., Козлов В. А. // Радиопизика. 1984. Т. 27. № 4. С. 523 (Изв. высш. учеб. заведений).
16. Баскин Э. М., Энтин М. В. // ФТП. 1974. Т. 8. Вып. 1. С. 64.

Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
14 августа 1986 г.

CARRIER REDISTRIBUTION AND HIGH-FREQUENCY NONLINEAR PHENOMENA IN INHOMOGENEOUS SEMICONDUCTOR FILMS

*A. M. Belyantsev, V. A. Valov, M. N. Drozdov, A. L. Zheleznyak,
V. A. Kozlov, M. L. Yakovlev*

Detection of impulsive radiation at 75 GHz in inhomogeneous n -GaAs films is experimentally investigated. It is shown that in inhomogeneous n -GaAs films a non-linearity mechanism determined by the spatial redistribution of carriers takes place, and delay in the frequency range till 75 GHz is absent. Applicability of this mechanism for detection of impulsive radiation in the 4 mm range with a power up to 1 kW is demonstrated.

Аннотации депонированных статей

УДК 537.874.6

ДИФРАКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РЕШЕТКИ ИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛУЦИЛИНДРОВ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НАД ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩИМ ЭКРАНОМ

Ф. Г. Богданов, Э. И. Сикмашвили, Н. Р. Хоменко

Рассматривается задача дифракции плоской электромагнитной волны на периодической отражательной решетке, образованной из бесконечно длинных полуцилиндров на металлической подложке.

Разработан новый эффективный метод для широкой средневолновой области, базирующийся на адекватном разложении поля по дифракционным и мультипольным гармоникам, позволяющий получить простую связь между различными неизвестными коэффициентами задачи и свести ее к одной бесконечной системе линейных алгебраических уравнений известного типа.

Получены и проанализированы численные данные для основных дифракционных характеристик и амплитудно-фазовые картины распределений поля в ближней зоне. Показано, что рассматриваемая дифракционная система сочетает свойства отражательных решеток и диэлектрических структур.

*Статья депонирована в ВИНТИ,
рег. № 6475-В 88. Деп. от 11 августа 1988 г.*