

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ
БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA,
AS THE BASES OF SENSORS

PACS 85.30.FG
УДК 621.382

ГАРМОНИЧЕСКИЕ МЭП-ДИОДЫ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

*С. В. Плаксин, И. И. Соколовский, В. С. Лукаш**

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины “Трансмаг”,
ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, 49005, тел. (8056)370-21-82, svp@westa-inter.com
*ГУП НИИ полупроводниковых приборов, ул. Красноармейская, 99а, Томск, 634042,
votoropin@mail.tomsknet.ru

Аннотация

ГАРМОНИЧЕСКИЕ МЭП-ДИОДЫ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

С. В. Плаксин, И. И. Соколовский, В. С. Лукаш

В работе представлены результаты теоретического (на базе локально-полевой модели эффекта Ганна) и экспериментального анализа возможности оптимизации параметра n_0L полупроводниковых структур с междолинным электронным переносом по критерию максимальной мощности в режимах с выделением высших гармоник. Показано, что генерируемая мощность на второй гармонике *GaAs*-диодами Ганна с параметром $n_0L=(3-4)\cdot 10^{12}$ см⁻² значительно (примерно в 5 раз) выше мощности, генерируемой структурами с $n_0L=(1-2)\cdot 10^{12}$ см⁻².

Ключевые слова: междолинный электронный перенос, высшие гармоники, эффект Ганна, локально-полевая модель, *GaAs*, параметр n_0L .

Анотація

ГАРМОНІЧНІ МЭП-ДІОДИ НА ОСНОВІ АРСЕНІДУ ГАЛІЯ

С. В. Плаксін, І. І. Соколовський, В. С. Лукаш

В роботі представлено результати теоретичного (на базі локально-польової моделі ефекту Ганна) і експериментального аналізу можливості оптимізації параметра n_0L напівпровідникових структур з міждолинним електронним перенесенням по критерію максимальної потужності в режимах з виділенням вищих гармонік. Показано, що потужність генерації на другій гармоніці *GaAs*-діодів Ганна з параметром $n_0L=(3-4)\cdot 10^{12}$ см⁻² значно (приблизно в 5 разів) вище за потужність, що генерується структурами з $n_0L=(1-2)\cdot 10^{12}$ см⁻².

Ключові слова: міждолинне електронне перенесення, вищі гармоніки, ефект Ганна, локально-польова модель, *GaAs*, параметр n_0L .

Summary

HARMONIC TED-DIODES ON THE BASE OF GALLIUM ARSENIDE

S. V. Plaksin, I. I. Sokolovskiy, V. S. Lukash

In this paper the results of theoretical (on the base of the local-field model of the Gunn effect) and experimental analysis of possibility for optimization of n_0L -parameter of such semiconductor structures with the intervalley electronic transfer on the criterion of maximal power in the modes with the selection of higher harmonics are represented. It is shown, that generated power on the second harmonic by the Gunn *GaAs*-diodes with the parameter $n_0L=(3-4)\cdot 10^{12}$ cm⁻² considerably (approximately 5 times) higher than the power, generated by structures with $n_0L=(1-2)\cdot 10^{12}$ cm⁻².

Keywords: intervalley electronic transfer, higher harmonics, the Gunn effect, local-field model, *GaAs*, parameter n_0L .

Введение

Совершенствование микросистемных технологий предполагает развитие методов построения целостных информационно-управляющих систем (ИУС) на базе многофункциональных безынерционных полупроводниковых элементов. Большими перспективами в этом отношении обладают полупроводниковые устройства на горячих электронах, проявляющие эффект отрицательной дифференциальной проводимости в СВЧ диапазоне, в частности диоды с междолинным переносом электронов (МЭП-диоды) [1]. Особую роль для разработки указанных быстродействующих мультисенсорных ИУС играет обеспечение когерентности зондирующих сигналов и сигналов, передающих измерительную информацию от сенсоров распределенных систем управления на центральный диспетчерский пункт. Поэтому столь актуальной является задача построения полупроводниковых генераторов, излучение которых было бы близким к монохроматическому (то есть, почти не содержащим обертонов) в различных участках СВЧ-диапазона. Решением этой задачи, в общем случае, может быть использование режима с выделением высших гармоник [2], однако значения кинетических параметров полупроводниковых структур для оптимизации коэффициента полезного действия при работе на гармониках не определены.

Оптимизация параметров МЭП структур по критерию максимальной мощности на заданной гармонике

Проведенные к настоящему времени теоретические и экспериментальные исследования по разработке полупроводниковых МЭП-дио-

дов свидетельствуют [1,2], что для повышения уровня генерируемой мощности в пролетных режимах следует увеличивать значение n_0L — произведение концентрации электронов n_0 на длину активной области диода L . Вместе с тем для повышения частоты генерации в пролетной моде с выделением основной гармоники следует уменьшать длину активной области, тем самым снижая уровень выходной мощности. Выходом из такой ситуации может быть использование режима с выделением второй и третьей гармоник [2].

Задачу оптимизации коэффициента полезного действия при работе на гармониках удастся решить с привлечением локально-полевой модели: скорость электронов является мгновенной функцией электрического поля в данной точке, времена релаксации энергии электронов малы по сравнению с временами формирования и рассасывания доменов сильного электрического поля и со временем пролета их через активную область полупроводниковой структуры [3].

В общем случае форма импульсов тока через полупроводниковую структуру, в которой проявляется эффект расслоения электрического поля на домены слабого и сильного поля, дрейфующие через полупроводниковую структуру (эффект Ганна), и с учетом временных интервалов, в течение которых происходит формирование и аннигиляция (рассасывание) доменов сильного электрического поля, а также пролетного времени, величина которого определяется контролирующим влиянием высокочастотного напряжения, развившегося в резонаторе, достаточно сложна [4] и представляет интерес при изучении тонких физических процессов.

При изучении энергетических характеристик для соизмеримых численных значений указанных характеристических времен импульсов тока достаточно воспользоваться относительно простой аппроксимацией, представленной на рис. 1, согласно которой выражение для тока можно записать в следующем виде:

$$I(t) = \begin{cases} I_0 \cos \frac{2\pi}{T_{np}} t, \text{ при } -\tau_a < t < \tau_\phi \\ I_0 \cos \frac{2\pi}{T_{np}} \tau_\phi, \text{ при } \tau_\phi < t < T_{np} - \tau_a \end{cases}, \quad (1)$$

где T_{np} — период колебаний, τ_ϕ — время формирования домена, τ_a — время аннигиляции домена на аноде, t — текущее время.

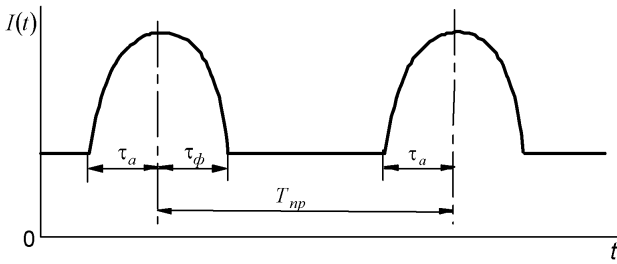


Рис. 1. Форма колебаний тока

Взаимосвязь между указанными характеристическими временами удобно представить через фазовый угол θ , именно:

$$\frac{2\pi}{T_{np}} (\tau_\phi + \tau_a) = 2\theta, \quad (2)$$

который представляет собой долю общего периода, приходящуюся на формирование и аннигиляцию доменов сильного электрического поля, и таким образом связывает геометрические размеры полупроводниковой структуры и кинетические характеристики материала. Действительно, из полевой модели эффекта Ганна [5] τ_ϕ и τ_a определяются как:

$$\tau_\phi = \ln \frac{1 + \sqrt{u}}{1 - \sqrt{u}} \cdot \tau_\Omega, \quad (3)$$

где $\tau_\Omega = \frac{1}{\mu_1} \left[\frac{\varepsilon L}{8\pi q n_0 (E_t - E_{r\min})} \right]^{1/2}$ представляет собой характерное время реакции домена на внешнее возмущение и одновременно используется в качестве характерного масштаба процессов развития домена; $u = \frac{(e^\tau - 1)^2}{(e^\tau + 1)^2}$, $\tau = \tau_\Omega \cdot t$;

E_t — пороговая напряженность поля для развития доменной неустойчивости, $E_{r\min}$ — напряженность поля вне домена сильного электрического поля, которое также является функцией параметра $n_0 L$, q — заряд электрона, ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала, $\mu_1(T)$ — подвижность электронов в слабом поле, зависящая от температуры T ; в расчетах использовалась зависимость для арсенида галлия $\mu_1(T) = \frac{1,8 \cdot 10^6}{T} \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ [3].

$$\tau_a \approx \frac{2(E_0 - E_r)}{E_r} \tau_\Omega. \quad (4)$$

С другой стороны время пролета домена через диод определяется как

$$T_{np} = \frac{L}{v_{dp}} \approx \frac{L}{\mu_1 E_{r\min}} \approx \frac{8\pi q n_0 L (E_t - E_{r\min})}{\varepsilon E_{r\min}} \tau_\Omega. \quad (5)$$

При подстановке (3)-(5) в (2) можем определить параметр $n_0 L$ как функцию фазового угла θ (приняв $\tau_\phi \approx 6\tau_\Omega$ [4]:

$$n_0 L = \left\{ \left(\frac{\pi}{\theta} \right) \left[6 + \frac{2(E_0 - E_r)}{E_r} \right] \frac{v_{dp}}{\mu_1(T)} \right\}^2 \times \frac{\varepsilon}{8\pi q (E_t - E_{r\min})} = \left(\frac{\pi}{\theta} \cdot \frac{16,5 v_{dp}}{\mu_1(T)} \right)^2 \frac{\varepsilon}{8\pi q (E_t - E_{r\min})}. \quad (6)$$

Из Фурье-анализа импульсов тока через полупроводниковую структуру (разложение такой формы импульса дано, в частности, в [6, С. 38-43]) определим коэффициенты ряда Фурье для периодической последовательности импульсов. В общем случае выражение для амплитуды n -ой гармоники имеет вид:

$$I_n = I_m \frac{2(\sin \theta \cos \theta - n \cos \theta \sin \theta)}{\pi n (n^2 - 1) (1 - \cos \theta)}, \quad (7)$$

где I_m — значение импульса при $\theta = \frac{\pi}{2}$.

Из графического представления амплитуд гармонических составляющих импульса тока (рис. 2) видно, что в зависимостях уровней тока на первой, второй и третьей гармонике от фазового угла имеются оптимальные фазовые углы, при которых могут быть достигнуты максимальные значения уровней второй и третьей гармоник.

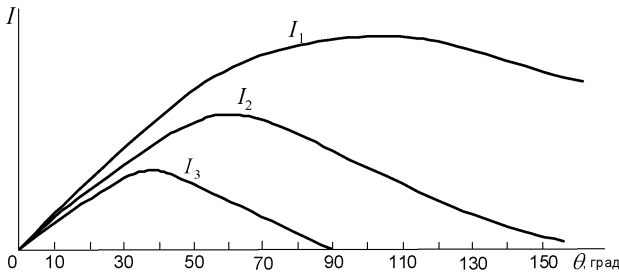


Рис. 2. Распределение амплитуд гармонических составляющих импульса тока в зависимости от фазового угла θ

В частности первая гармоника I_1 имеет плоский растянутый максимум, который начинается при $\theta=90^\circ$, вторая I_2 и третья I_3 гармоники имеют довольно острый максимум при $\theta=60^\circ$ и 40° , соответственно. Без оптимизации полупроводниковых структур по параметру n_0L максимально возможная мощность на второй и третьей гармониках может составить соответственно 25 % и 13 % от максимума по первой гармонике. В то же время при оптимальных значениях фазовых углов по гармоникам можно получить 50 % на второй гармонике и 40 % на третьей гармонике от мощности на первой гармонике [7, С. 284-285].

Расчетные и экспериментально измеренные значения n_0L для электронного арсенида галлия с учетом зависимости дрейфовой скорости от частоты [8] для первой, второй и третьей гармоник при температуре 400 К представлены на рис. 3. Измерения проводились для структур, параметр n_0L для которых соответствовал интервалу максимальных значений токов соответствующих гармоник на рис. 2.

Из представленных на рис. 3 данных видно, что с ростом номера гармоники величина

оптимального значения n_0L возрастает и существенно превышает общепринятые величины [3].

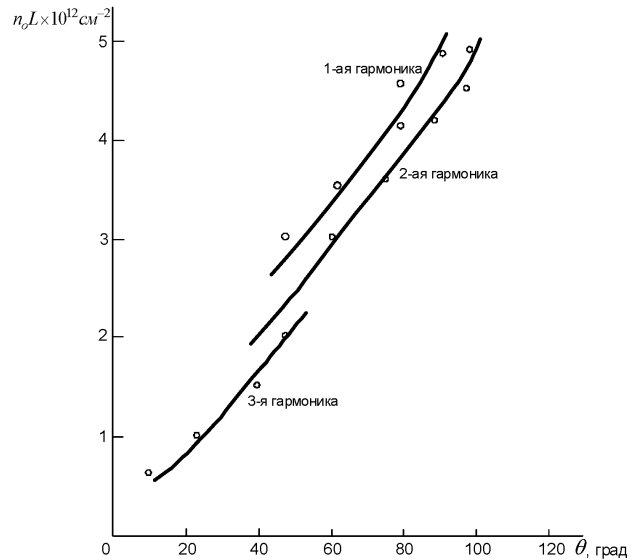


Рис. 3. Значения параметра n_0L в электронном арсениде галлия для соответствующих фазовых углов на первой, второй и третьей гармониках при температуре 400 К (сплошные линии — расчетные, точкам соответствуют экспериментальные значения)

С целью верификации полученного теоретического вывода проведены экспериментальные исследования двух групп полупроводниковых структур из арсенида галлия: с общепринятым значением параметра $n_0L = (1-2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и рекомендованным в соответствии с разработанной моделью, именно $n_0L = (3-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, результаты которых приведены в таблице 1. В таблице U_p, I_p — рабочее напряжение на диодной структуре и рабочий ток, f, P — генерируемая частота и мощность, η — коэффициент полезного действия.

Таблица 1

№	$n_0L = (1-2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$									$n_0L = (3-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$								
	U_p (В)	I_p (А)	1-ая гармоника			2-ая гармоника			n_0L $\cdot 10^{12}$ см^{-2}	U_p (В)	I_p (А)	1-ая гармоника			2-ая гармоника			n_0L $\cdot 10^{12}$ см^{-2}
			f , ГГц	P , мВт	η , %	f , ГГц	P , мВт	η , %				f , ГГц	P , мВт	η , %	f , ГГц	P , мВт	η , %	
1	5,0	0,5	30,0	150	4,4	60	15	0,6	1,4	5,0	0,5	30	120	4,8	60	60	2,4	3,3
2	5,15	0,6	30,0	130	4,25	60	20	0,65	1,6	5,0	0,4	35	85	4,25	70	40	2,0	3,1
3	5,0	0,9	30,0	90	2,0	60	13	0,29	1,4	5,0	0,5	28	160	6,4	56	80	3,2	3,1
4	3,5	0,7	42,5	45	1,84	85	2	0,08	1,7	3,9	0,6	45	75	3,2	90	30	1,28	3,4
5	4,3	0,7	45,0	70	2,44	90	12	0,42	1,9	3,7	0,7	45	90	3,5	90	40	1,54	3,3

Данные таблицы демонстрируют, в частности, что генерируемая мощность на второй

гармонике структурами с $n_0L = (3-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ значительно (примерно в 5 раз) выше

мощности, генерируемой структурами с $n_0L = (1-2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Выводы

Таким образом, в работе теоретически и экспериментально обоснована возможность оптимизации параметра n_0L полупроводниковых структур, проявляющих эффект междолинного переноса, по критерию максимальной мощности в режимах с выделением высших гармоник. Приведенные расчетные значения, подтвержденные экспериментально, явились основой для промышленного производства диодов, работающих в диапазоне до 160 ГГц, а также для научно-исследовательских работ по разработке аппаратуры электромагнитной миллиметровой терапии. В указанных режимах достигаются высокие значения рабочей частоты и коэффициента полезного действия. При этом указанные генераторные структуры целесообразно устанавливать в электродинамических системах, которые для основной (пролетной) частоты являются запредельными.

Использованные источники

1. Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Соколовский И. И. Физические основы построения быстродействующих информационно-управляющих систем на электрически активных полупроводниках // Сенсорная электроника и микросистемные технологии. — 2006. — № 2. — С. 47-58.
2. Москалюк В. О. Фізика електронних процесів: Динамічні процеси. — Київ: "Політехніка", 2004. — 178 с.
3. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия: Пер. с англ. М: Мир, 1991. — 632 с.
4. Костылев С. А., Гончаров В. В., Соколовский И. И., Челядин А. В. Полупроводники с объемной отрицательной проводимостью в СВЧ полях. — Киев: Наукова думка, 1987. — 141 с.
5. Левинштейн М. Е., Пожела Ю. К., Шур М. С. Эффект Ганна. — М.: Сов. радио, 1975. — 288 с.
6. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Высшая школа, 1988. — 448 с.
7. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Сов. радио, 1964. — 695с.
8. Rees H. D. Time response of the high-field electron distribution function in GaAs // IBM J. of Res. and Development. — V.13. — 1969, N 9. — P. 537-542.