

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ВОЛНОВОДАХ С МОДУЛИРОВАННЫМ ПРОФИЛЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

К. Б. Микитчук

Разработка компактных источников среднего и дальнего ИК диапазона в настоящее время является актуальной задачей. Подход к получению среднего и дальнего ИК излучения, который может обеспечить генерацию при комнатной температуре, состоит в использовании нелинейных эффектов в арсениде галлия [2], [3], [4].

Основная трудность для эффективной нелинейной генерации состоит в необходимости выполнения условия фазового синхрониз-

ма, так из-за нормальной дисперсии показателя преломления фазовая скорость волны нелинейной поляризации, как правило, оказывается меньше фазовой скорости разностной моды.

Выход из данной ситуации — использование нелинейных эффектов. Из-за нелинейности арсенида галлия в нем происходит усиление и ослабление электрического поля [1]. В случае, когда структура полупроводникового лазера выращена на плоскости (001), а высокочастотные моды имеют ТЕ-поляризацию, нелинейная поляризация в GaAs перпендикулярна плоскости слоев и возбуждает на разностной частоте ТМ-моду [5]. Решение уравнений для ТМ мод полагалось в виде суперпозиции основной и двух боковых гармоник:

$$H_y = H_y(z) \exp(ik_x x) + H_y^+(z) \exp(i(k_x + \beta)x) + H_y^-(z) \exp(i(k_x - \beta)x) \quad (1)$$

Здесь $H_y(z)$, $H_y^+(z)$, $H_y^-(z)$ - амплитуды гармоник магнитного поля: центральной, правой и левой соответственно. k_x - величина волнового вектора высокочастотных мод, β - частота гофрировки профиля диэлектрической проницаемости.

Пренебрегая членами второго порядка малости по амплитуде гофра профиля диэлектрической проницаемости, из уравнений для ТМ мод получили систему связанных уравнений.

Уравнение для основной гармоники:

$$\begin{aligned} & [\varepsilon(z) \frac{d}{dz} \frac{1}{\varepsilon(z)} \frac{d}{dz} + \varepsilon(z) \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2] H_y(z) \\ & + \frac{1}{2} [\kappa(z) \frac{d}{dz} \frac{1}{\varepsilon(z)} \frac{d}{dz} - \varepsilon(z) \frac{d}{dz} \frac{\kappa(z)}{\varepsilon^2(z)} \frac{d}{dz}] (H_y^+(z) + H_y^-(z)) \quad (2) \\ & + \frac{1}{2} \beta \frac{\kappa(z)}{\varepsilon(z)} [(k_x - \beta) H_y^-(z) - (k_x + \beta) H_y^+(z)] = -2\varepsilon^{(2)} \frac{k_x \omega}{c} A_1^* A_2 \end{aligned}$$

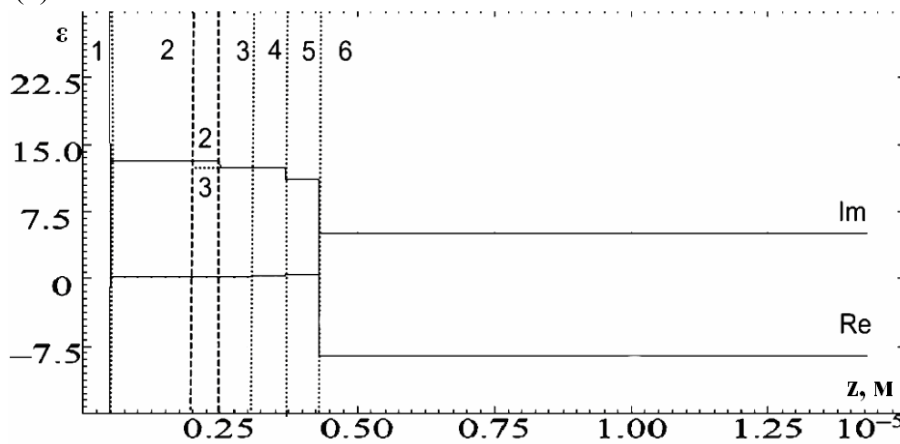


Рис. 1 Параметры слоев на профиле диэлектрической проницаемости: 1-металл, 2-GaAs, 2/3-слой с гофром вдоль перпендикулярной координаты, 3- InGaP, 4-GaAs, 5-InGaP, 6-GaAs

Здесь $\kappa(z)$ - амплитуда гофра диэлектрической проницаемости, A_1, A_2 - амплитуды электрического поля высокочастотных мод, при этом знак $*$ означает комплексное сопряжение.

Уравнения для правой и левой гармоник соответственно:

$$\begin{aligned} & [\varepsilon(z) \frac{d}{dz} \frac{1}{\varepsilon(z)} \frac{d}{dz} + \varepsilon(z) \frac{\omega^2}{c^2} - (k_x \pm \beta)] H_y^\pm(z) \\ & + \frac{1}{2} [\kappa(z) \frac{d}{dz} \frac{1}{\varepsilon(z)} \frac{d}{dz} - \varepsilon(z) \frac{d}{dz} \frac{\kappa(z)}{\varepsilon^2(z)} \frac{d}{dz} \pm k_x \beta \frac{\kappa(z)}{\varepsilon(z)}] H_y(z) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Поиск решений полученных уравнений проводился для структуры, изображенной на рис. 1.

С учетом кусочно-разностных аппроксимаций совокупность систем уравнений (2) – (3) для всей сетки точек на структуре (рис. 1) стала основой для матрицы связанных коэффициентов, где в каждой вертикальной группе из трех строк решалась система уравнений (2) – (3) в трех точках. Вектор неизвестных сформирован чередованием гармоник.

Для корректного определения показателя преломления на разностной частоте были учтены вклады в диэлектрическую проницаемость свободных носителей и оптических фононов (модель Друде).

Численное решение задачи с параметрами исследуемой структуры (рис. 1) дало зависимость напряженности магнитного поля от координаты (рис. 2).

В области длин волн предполагаемого квазисинхронизма амплитудные зависимости поля меняли свой вид: имели характер, близкий к стоячим волнам.

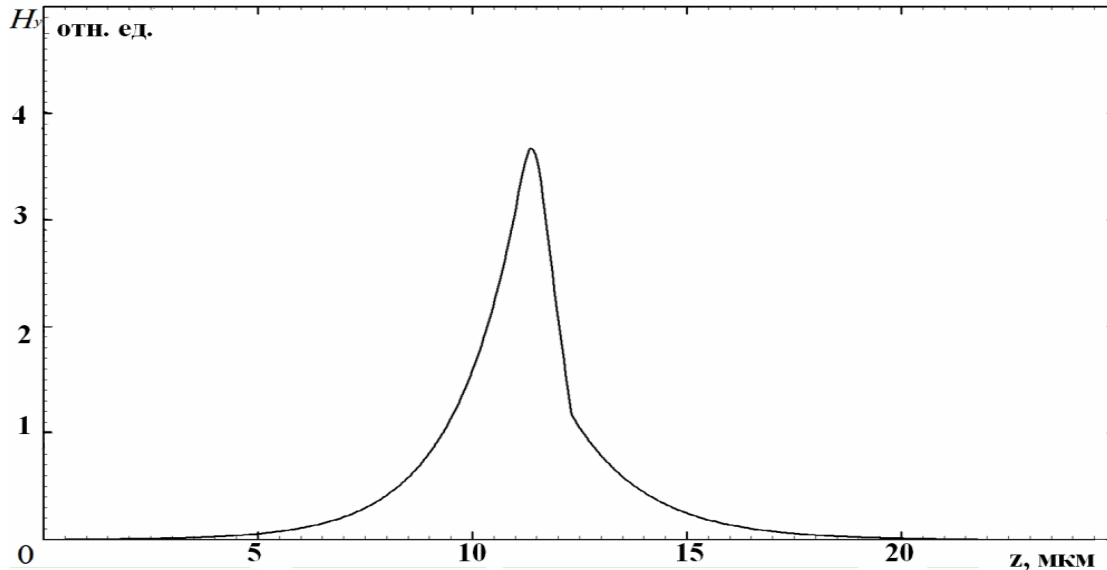


Рис. 2 Зависимость напряженности магнитного поля от координаты в одном из сечений структуры с гофрированным профилем диэлектрической проницаемости.

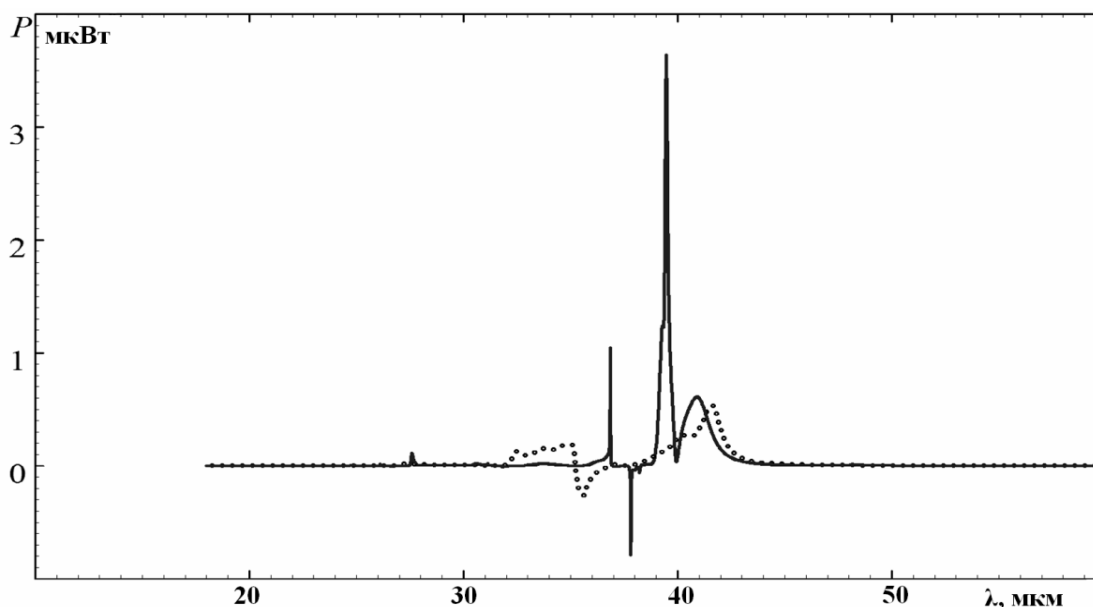


Рис. 3 Зависимость интеграла от потока мощности, генерируемой в волноводе с гофрированным профилем диэлектрической проницаемости, от длины волны (сплошная линия). Зависимость интеграла от потока мощности структуры с идентичными параметрами, но в отсутствии квазисинхронизма.

Правильность работы численной модели контролировалось рядом способов: проверялась непрерывность производных от полей и самих полей в моделируемой структуре.

Было замечено, что записанные ранее уравнения вырождаются при нулевой амплитуде гофра в уравнение для центральной ненулевой гармоники, что позволило проверить правильность работы численной модели по затуханию для слоев волноводной структуры.

После расчета зависимости мощности от длины волны была получена кривая (рис. 3), имеющая несколько резонансных всплесков. При ее рассмотрении следует учесть, что под мощностью подразумевается интеграл от потока мощности, который может быть как положительным, так и отрицательным в соответствии с направлением излучения мощности. Таким образом отрицательную мощность здесь следует рассматривать как мощность излучения, направленного в сторону убывания координатной оси в исследуемой структуре. Характерной особенностью явилось то, что наблюдалось изменение мощности во всплесках на один–два порядка в дальнем ИК диапазоне. Это явилось следствием того, что наблюдаемый эффект связан с квазисинхронизмом. Также была зафиксирована зависимость положения резонанса на кривой (рис. 3) от параметров гофра.

В результате была показана возможность реализации квазисинхронизма в структуре с модулированным диэлектрическим волноводом, что

позволило увеличить мощность нелинейной генерации на один-два порядка. Подбор параметров гофра и структуры в целом позволит разработать наиболее оптимальные характеристики волноводов для практической реализации.

Литература

1. *Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В.* Прикладная нелинейная оптика. М., Физматлит, 2004.
2. *Алешкин В.Я., Афоненко А.А., Звонков Н.Б.* ФТП, 2001, 35 (10), 1256.
3. *Афоненко А.А., Алешкин В.Я., Дубинов А.А.* ФТП, 2004, 38 (2), 244.
4. *Afonenko A.A., Aleshkin V.Ya., Dubinov A.A.* Semicond. Technol., 2005, 20 (5), 357.
5. *Алешкин В.Я., Звонков Б.Н., Некоркин С.М., Кочаровский Вл.В.* ФТП, 2005, 39 (1), 171.
6. *Faist J., Hofstetter D., Beck M. et al.* // IEEE J. Quantum Electron. 2002. Vol. 38. N 6. P. 533–546.