

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**Зависимость ширины запрещенной зоны тонких пленок нитрида кремния
от соотношения газов аргона и азота при магнетронном распылении**
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4052 группы
направления 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
института физики

Лысикова Андрея Дмитриевича



Научные руководители:

Доцент кафедры медицинской
физики, к.ф.-м.н.

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой физики твёрдого
тела:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

 17.06.24

подпись, дата

М.Ю. Калинин

инициалы, фамилия

 17.06.24

подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2024

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире исследование и разработка тонких пленок нитрида кремния играют важную роль в различных областях науки и техники, включая электронику, фотонику, солнечные батареи, оптику и многие другие. Эти пленки обладают уникальными оптическими свойствами, что делает их востребованными для различных приложений. Одним из широко используемых методов получения тонких пленок нитрида кремния является магнетронное распыление. Этот метод позволяет получать пленки высокой чистоты с отличными оптическими характеристиками. Изучение спектральной зависимости оптических свойств пленок, полученных методом магнетронного распыления, является ключевым для понимания их поведения и оптимизации производственных процессов.

Цель работы: найти связь между условием процесса напыления, а именно соотношением потоков газов азота и аргона в смеси, и шириной запрещенной зоны пленок нитрида кремния.

Задачи:

1. Ознакомиться с методом определения ширины запрещенной зоны, а также провести обзор литературы по магнетронному распылению;
2. Провести спектроскопию в УФ и видимой области предоставленных пленок нитрида кремния на кварцевых подложках;
3. Проанализировать полученные спектральные графики методом Тауца в программном обеспечении SciLab и определить ширину запрещенной зоны для разных образцов нитрида кремния;

Работа выполнена на 42 страницах, состоит из введения, теоретического обзора, практической части, заключения, списка использованных источников. Работа содержит 28 рисунков, 2 таблиц, список использованных источников состоит из 21 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматривается актуальность работы, определяется цель и задачи исследования.

Первая глава посвящена рассмотрению технологии магнетронного распыления тонких пленок, основным этапам работы устройства магнетронного распыления.

В МРУ применяется аномальный тлеющий разряд, который локализуется у поверхности мишени в неоднородных пересекающихся электрическом и магнитном полях. Электроны, выбиваемые с поверхности мишени вследствие ионной бомбардировки, захватываются магнитным полем и движутся по сложным циклическим траекториям у распыляемой поверхности, многократно сталкиваясь с атомами рабочего газа и ионизируя их. Это приводит к высокой степени ионизации газа и значительному увеличению эффективности распыления материала мишени.

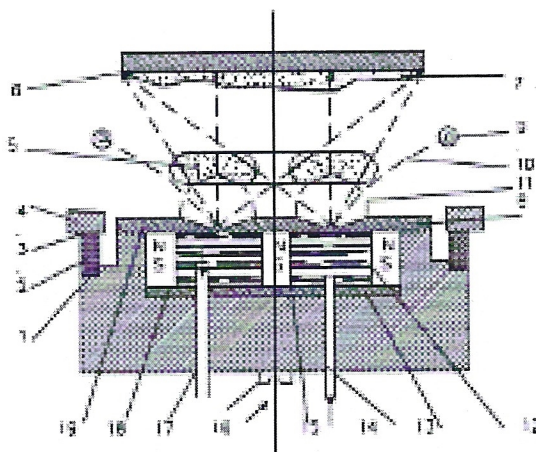


Рисунок 1 – Схема типичной конструкции планарного МРУ

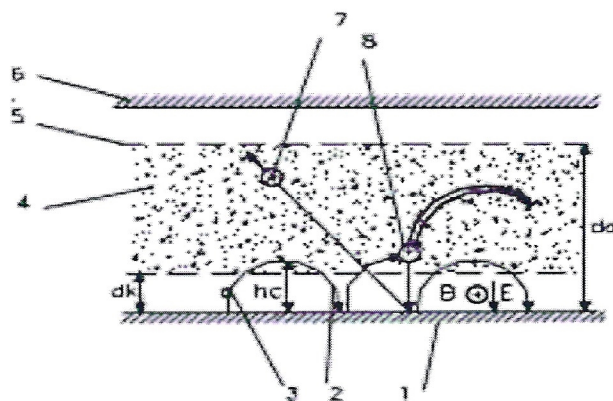


Рисунок 2 – Разрядный промежуток МРУ: 1 – катод; 2 – траектория вторичного электрона; 3 – электрон; 4 – плазма; 5 – виртуальный анод; 6 – анод; 7 – распыленная частица; 8 – ион

Во второй главе был рассмотрен метод определения ширины запрещенной зоны по спектру фундаментального поглощения и дополняющий его график Тауца, делающий анализ более наглядным.

В идеальном полупроводнике валентная зона при абсолютном нуле температуры полностью заполнена, что делает единственно возможным переход электрона в более высокое энергетическое состояние — в зону проводимости. При этом электрон поглощает квант энергии, достаточный для такого перехода. Спектр поглощения в этом случае представляет собой непрерывную кривую, которая плавно убывает с увеличением длины волны. Пусть границы энергетических зон в пространстве волнового вектора k располагается так (см. рисунок 3), что минимум зоны проводимости и максимум валентной зоны находится при $k=0$.

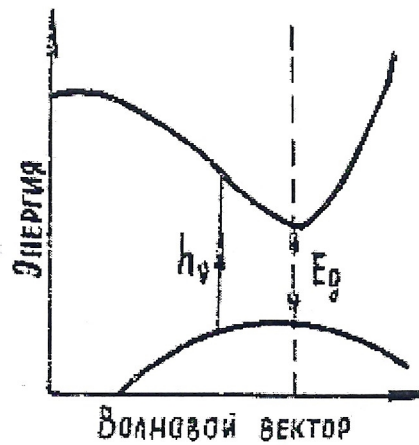


Рисунок 3 – Экстремумы энергетических зон в пространстве волнового вектора при $k=0$

Если экстремумы зоны проводимости и валентной зоны расположены при различных значениях k (см. рисунок 4), то граница области интенсивного поглощения будет близка к длине волны, соответствующей минимальной ширине запрещенной зоны E_g .

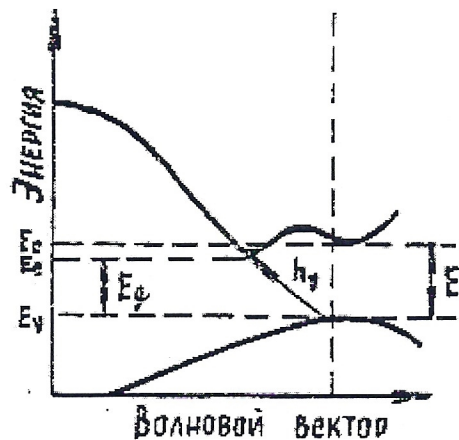


Рисунок 4 – Экстремумы энергетических зон в пространстве волнового вектора при разных k

В своей оригинальной работе Ян Тауц демонстрировал, что спектр оптического поглощения аморфного германия схож с спектром не прямых переходов в кристаллическом германии. Он предложил метод экстраполяции для определения оптической запрещенной зоны этих кристаллоподобных состояний. Обычно на графике Тауца по оси абсцисс откладывается энергия фотона $h\nu$, а по оси ординаты – корень из показателя поглощения материала

$(\alpha h\nu)^{1/2}$. Таким образом, экстраполяция этой линейной области по оси абсцисс позволяет определить энергию оптической запрещенной зоны для аморфного материала (см. рисунок 5).

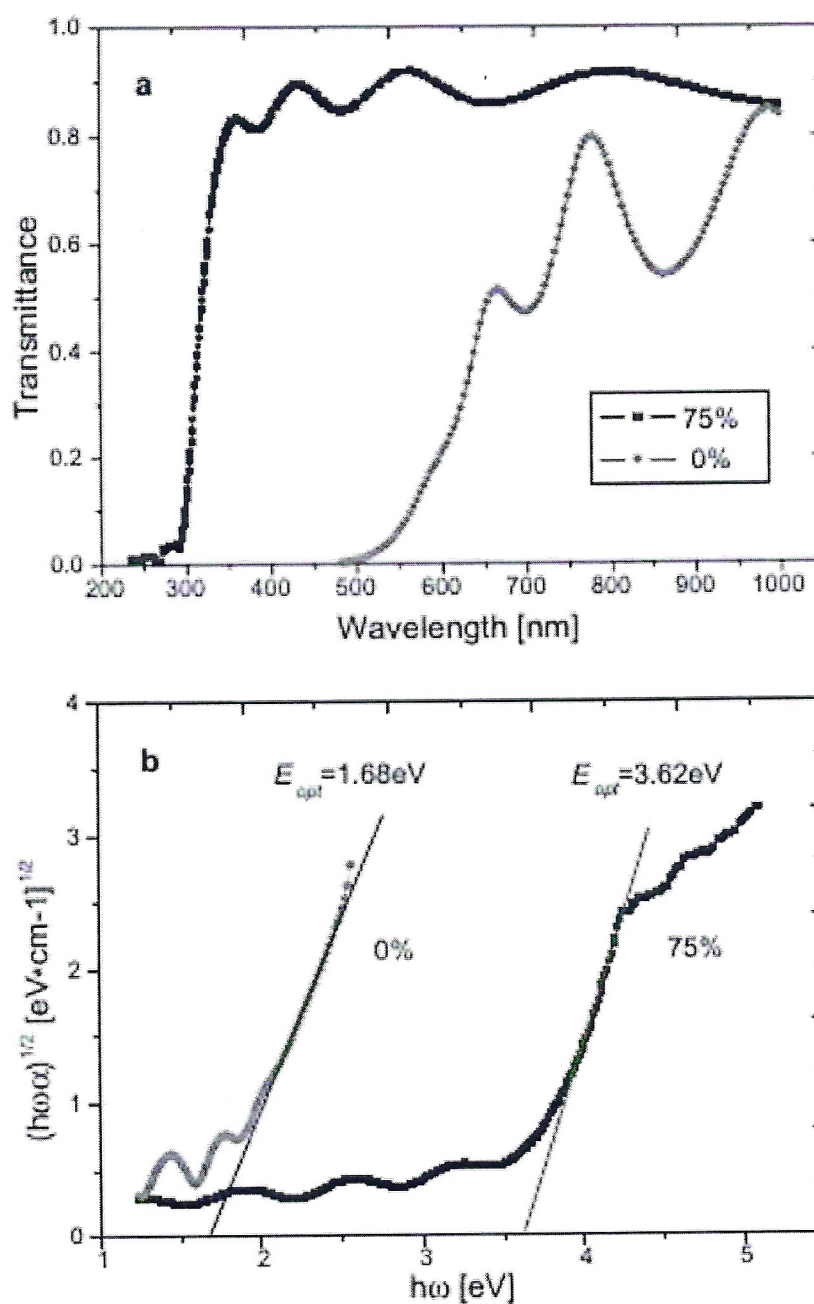


Рисунок 5 – Спектры пропускания для плёнок SiNx, осажденных при доле N_2 75% и 0%. (a) Расчет оптической запрещенной зоны плёнок SiNx методом Тауца. (b) Из статьи Yao, Zh Q., et al. "Composition, structure and properties of SiNx films fabricated by pulsed reactive closed-field unbalanced magnetron

sputtering." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 240.3 (2005): 741-751.

В третьей главе были рассмотрены характеристики нитрида кремния, рассмотрена экспериментальная установка и проведен анализ и преобразование полученных данных в программном обеспечении SciLab.

Таблица 1 – Соотношения потоков газов Ar и N₂ при осаждении

Образцы на кварце	Поток Ar, см ³ /мин	Поток N ₂ , см ³ /мин
Образец 1	10	10
Образец 2	12	8
Образец 3	14	6
Образец 4	16	4
Образец 5	18	2
Образец 6	20	0

Излучение источника света (дейтериевой лампы D2 или галогенной лампы W1) отражается зеркалом M1 и попадает в монохроматор. Переключение источника света происходит автоматически на установленной ранее длине волны (см. рисунок 6).

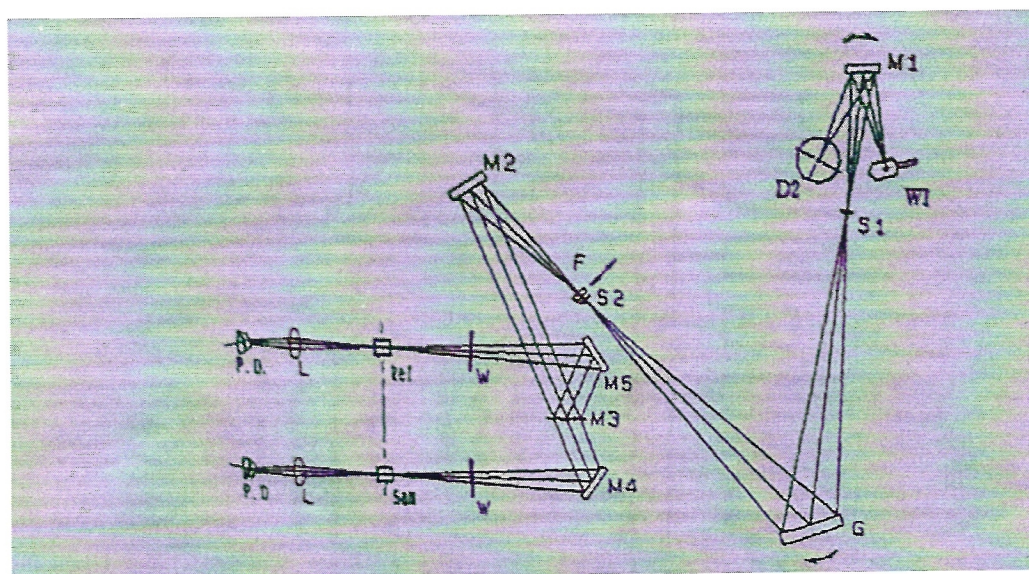


Рисунок 6 – Оптическая схема прибора

Обработка полученных данных проводилась в программном обеспечении Scilab (рис. 7-10).

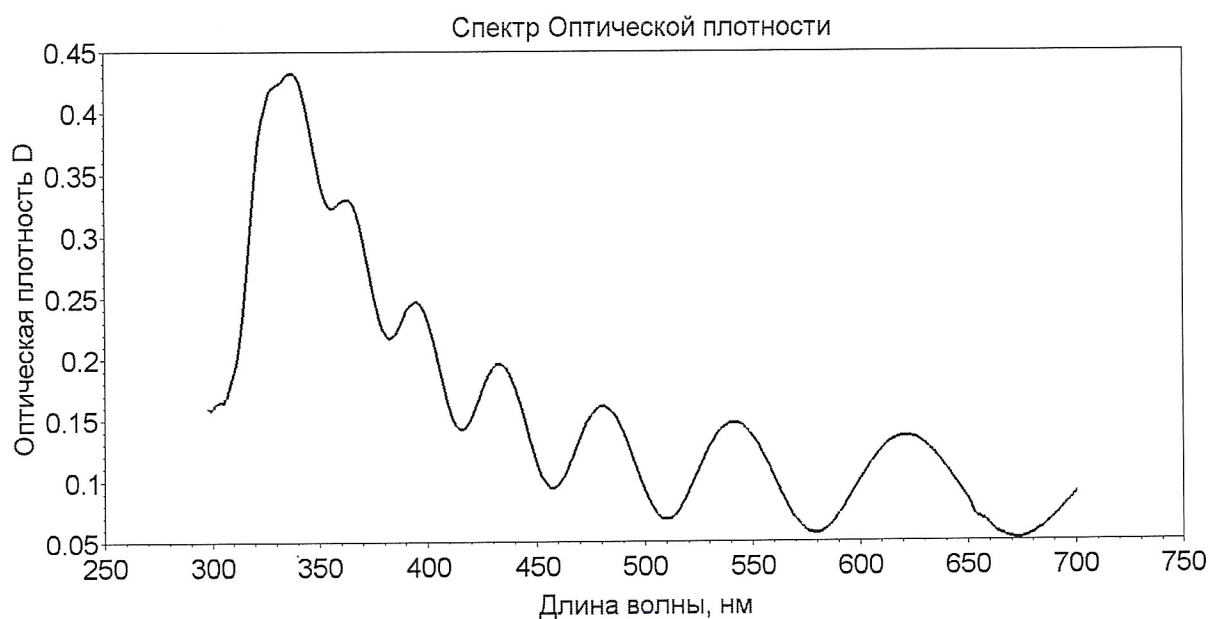


Рисунок 7 – Экспериментальные данные спектра оптической плотности образца 3 пленки нитрида кремния с соотношением потоков 14/6 на кварцевой подложке



Рисунок 8– Экспериментальные данные спектра оптической плотности образца 4 пленки нитрида кремния с соотношением потоков 16/4 на кварцевой подложке

Чтобы преобразовать спектр оптической плотности в спектр энергии фотона, был использован 2 постулат Бора: $E_{\phi} = h\nu = hc/\lambda$

Поскольку эксперимент дал данные об оптической плотности, их необходимо преобразовать в коэффициент поглощения для корректной визуализации и определения ширины запрещенной зоны.

Оптическая плотность, или абсорбция, определяется через интенсивности падающего (I_0) и прошедшего (I) света:

$$D = \lg \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

Уравнение Бугера-Ламберта-Бера:

Уравнение связывает коэффициент поглощения (α) и толщину материала (d) с интенсивностью света:

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (2)$$

Связь D и α :

Переходим от уравнения Бугера-Ламберта-Бера к логарифмическому выражению:

$$D = \alpha d * \lg(e) \approx 0,4343 \alpha d, \quad (3)$$

Где $\lg(e) \approx 0,4343$.

Из этого выражения выходит, что:

$$\alpha = \frac{D}{0,4343 d} \quad (4)$$

Для подтверждения зависимости ширины запрещенной зоны плёнок SiN_x в начальном состоянии от химического состава (атомное отношение N/Si), оптические запрещенные зоны были определены с использованием следующего уравнения Тауца:

$$\sqrt{(h\nu\alpha)} = A(h\nu - E_g) \quad (5)$$

На основе этих расчетов было проведено преобразование спектров образцов и расчет ширины запрещенной зоны методом экстраполяции линейной части кривой до точки $(h\nu\alpha)^{1/2} = 0$.

Графики, показывающие результат расчета с помощью метода Тауца.

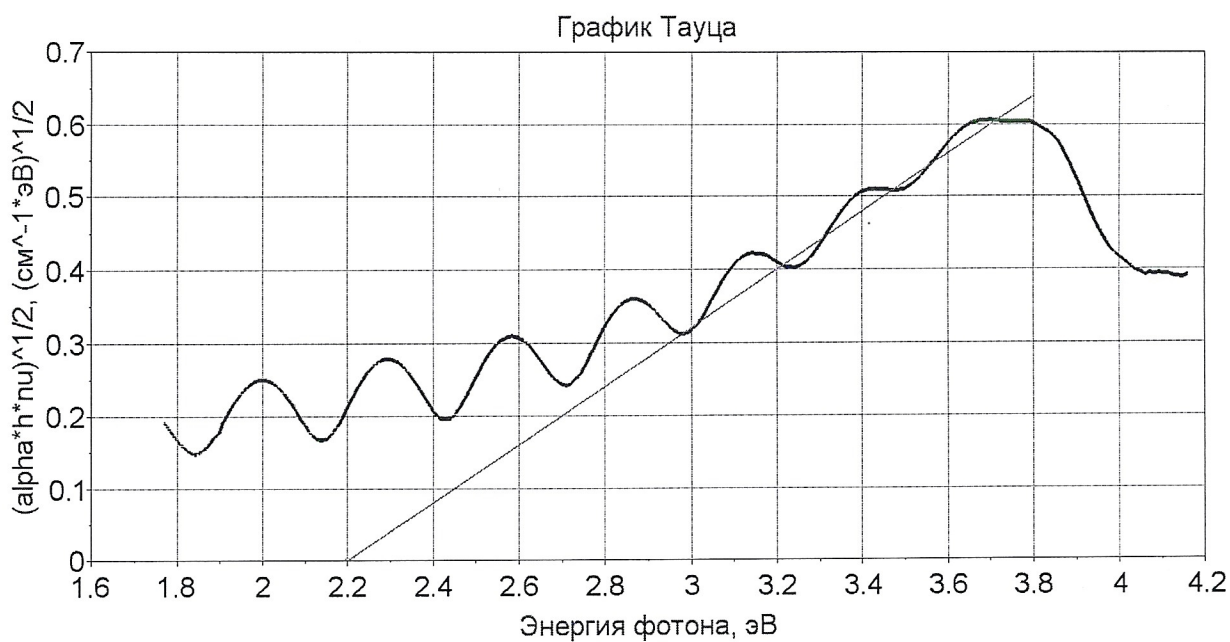


Рисунок 9 – Преобразованный спектр $(h\nu\alpha)^{1/2}$ образца 3 от энергии фотона и экстраполяционная прямая, выделенная красным цветом

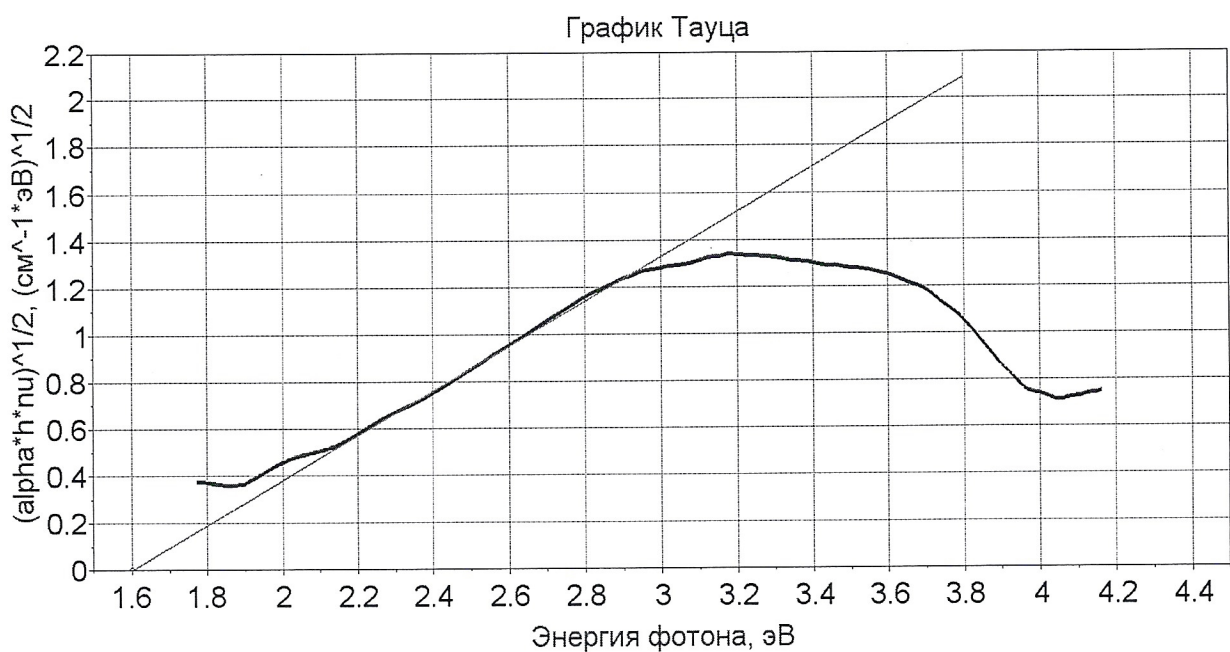


Рисунок 10 – Преобразованный спектр $(h\nu\alpha)^{1/2}$ образца 4 от энергии фотона и экстраполяционная прямая, выделенная красным цветом

Таблица 2 –Ширина запрещенной зоны и объем N₂ при осаждении

Образцы на кварце	Ширина запрещенной зоны, эВ	Поток напущенного в камеру N ₂ , см ³ /мин
Образец 1	-	10
Образец 2	-	8
Образец 3	2.2	6
Образец 4	1.6	4
Образец 5	1.37	2
Образец 6	1.25	0

При увеличении содержания азота середина области фундаментального поглощения смещается к коротким длинам волн от красного к синему цвету (рис. 11).

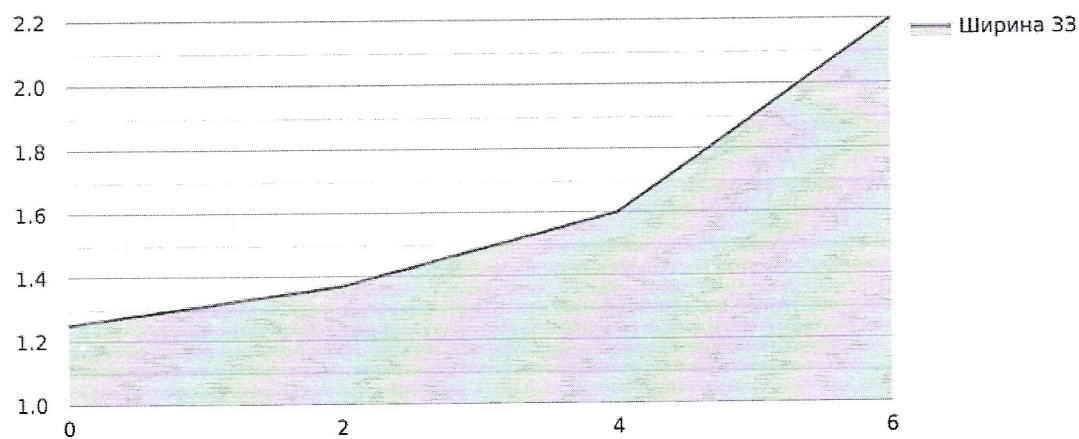


Рисунок 11 – График, показывающий увеличение ширины запрещенной зоны с ростом количества азота при напылении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было выявлено влияние соотношения потоков газов аргона и азота на величину ширины запрещенной зоны тонких пленок нитрида кремния, полученных методом магнетронного распыления.

- 1) В образцах 1 и 2 отсутствует прямой участок на графике, что исключает чистую область фундаментального поглощения и возможность применения метода Тауца к этим образцам.
- 2) При увеличении содержания азота в смеси в процессе нанесения пленки ширина запрещенной зоны также увеличивается, возрастая с 1.25 эВ до 2.2 эВ.
- 3) Минимальная ширина запрещенной зоны составляет 1.25 эВ в случае, когда в процессе нанесения пленки не использовался азот. Это связано с формированием пленки из чистого кремния ($E_g = 1.12$ эВ).
- 4) При увеличении содержания азота середина области фундаментального поглощения смещается к коротким длинам волн от красного к синему цвету.