

THIẾT KẾ CẤU TRÚC GHÉP NỐI QUANG DẠNG VUỐT THON TỪ POLYMER CHO MẠCH TÍCH HỢP QUANG

Ngô Sỹ Dũng⁽¹⁾, Nguyễn Thanh Phương⁽¹⁾, Phạm Phương Nam⁽²⁾,
Tống Quang Công⁽²⁾, Trần Quốc Tiến⁽²⁾

¹ Viện Vật lý Kỹ thuật, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

² Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Ngày nhận bài 18/02/2020, ngày nhận đăng 29/4/2020

Tóm tắt: Để dẫn tín hiệu vào trong các mạch tích hợp quang mà không suy hao đáng kể, chúng ta phải sử dụng các cấu trúc dẫn sóng có đường kính nhỏ khoảng một vài μm , tuy nhiên các sợi quang thông thường lại có kích thước lớn hơn - cỡ 10 μm . Vì vậy để ghép nối hai loại cấu trúc dẫn sóng này với hiệu suất ghép nối cao người ta dùng một cấu trúc có dạng vuốt thon hay còn gọi là taper. Nghiên cứu của chúng tôi chỉ ra, tùy vào các tham số trong cấu trúc của taper - chiều dài, độ cong hai mặt bên, đường cong mặt trên... hiệu suất truyền của nó sẽ thay đổi. Trong bài báo này, chúng tôi chỉ tập trung chủ yếu vào ảnh hưởng của độ cong hai mặt bên vào hệ số truyền dẫn của taper để đưa ra cấu trúc tối ưu.

Từ khóa: Tích hợp quang; cấu trúc dẫn sóng; cấu trúc vuốt thon.

1. Mở đầu

Băng thông của một hệ thống truyền dẫn thông tin bị giới hạn bởi độ trễ, tốc độ đáp ứng gây ra bởi các linh kiện mà hệ thống đó sử dụng. Từ đầu những năm 2000, việc tích hợp các linh kiện quang học và các chip bán dẫn silicon để tạo ra một mạch tích hợp quang học đã được chú trọng đặc biệt nhằm nâng cao tốc độ hoạt động của hệ thống [1 - 3]. Các mạch tích hợp quang được chế tạo từ các linh kiện cơ bản bao gồm các cấu trúc dẫn sóng, cấu trúc vi cộng hưởng, lọc quang...v.v. Để đảm bảo tín hiệu truyền dẫn trong các linh kiện này suy hao không đáng kể và trường tín hiệu quang dẫn trong đó hoạt động ở chế độ đơn một không gian, các linh kiện này yêu cầu được chế tạo ở kích thước nhỏ khoảng một vài μm . Trong khi đó, các hệ thống thường được kết nối trực tiếp với nhau sử dụng sợi quang đơn một có kích thước đường kính lõi dẫn sóng khoảng 9 μm .

Để có thể kết nối giữa 2 loại cấu trúc dẫn sóng có đường kính khác nhau này, chúng tôi đã sử dụng một cấu trúc quang học được chế tạo trên nền vật liệu polymer có dạng vuốt thon gọi là taper. Những nghiên cứu gần đây [4 - 6] cho thấy việc sử dụng taper có thể làm giảm tổn hao do truyền dẫn giữa 2 sợi quang có đường kính chênh lệch. Trong bài báo này, chúng tôi tiến hành mô phỏng các thông số cấu trúc khác nhau dẫn đến hệ số truyền của taper thay đổi và khảo sát sự thay đổi này để tìm ra cấu trúc tối ưu nhất.

2. Phương pháp mô phỏng

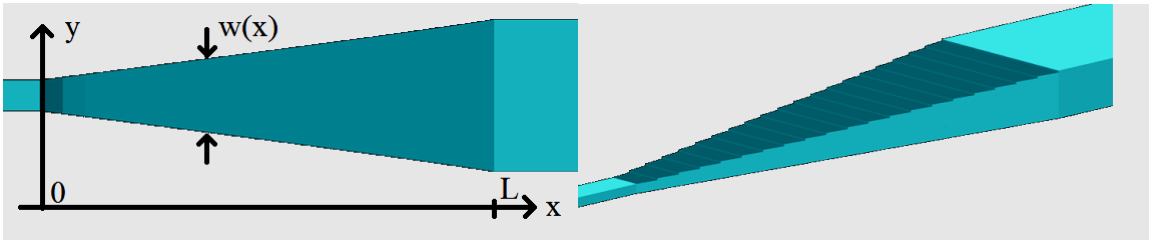
2.1. Cấu trúc của hệ

Hệ quang học được thiết kế trên một tấm đế phẳng để có thể dễ dàng ghép đặt trong các mạch quang. Cấu trúc của taper bao gồm: 2 cấu trúc dẫn sóng có dạng hình hộp

chữ nhật ở 2 phía để ghép nối với sợi quang đầu vào và ra, thiết diện của chúng là hình vuông có cạnh bằng đường kính của sợi quang truyền vào và ra. Ở đây chúng tôi sử dụng kích thước 2 sợi quang lần lượt là 2 μm và 10 μm ; phần ở giữa là cấu trúc chính của taper, có dạng thấu vuông, dài $L = 30 \mu\text{m}$, hai đầu gắn liền với hai phía của dẫn sóng, mặt trên là một mặt phẳng nghiêng, hai mặt bên đối xứng và là mặt cong (Hình 1 và Hình 2). Biên dạng này được biểu diễn bằng công thức:

$$w(x) = \alpha(L-x)^m + w_2 \quad (1)$$

trong đó $w(x)$ là chiều rộng (theo trục y) của taper tại điểm cách đầu ra khoảng x . $w(0) = w_1 (= 2), w(L) = w_2 (= 10)$; $\alpha = (w_1 - w_2)/L^m$, m là tham số.



Hình 1: Mặt cắt Oxy của taper

Hình 2: Mô hình 3D của taper

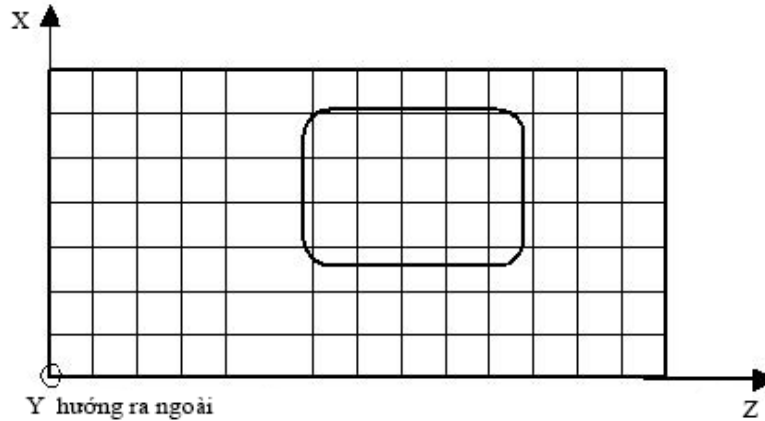
2.2. Phần mềm mô phỏng

Các phần mềm mô phỏng được dựa trên phương pháp Chia nhỏ phần tử theo miền thời gian (Finite Difference Time Domain - FDTD). Phương pháp FDTD đã được thành lập như một công cụ kỹ thuật mạnh mẽ cho các mô phỏng thiết bị quang học tích hợp và nhiễu xạ. Điều này là do sự kết hợp các tính năng độc đáo của nó, chẳng hạn như khả năng mô hình hóa sự lan truyền ánh sáng, tán xạ và nhiễu xạ, các hiệu ứng phản xạ và phân cực. Nó cũng có thể mô hình hóa bất đẳng hướng và phân tán vật chất mà không có bất kỳ giả định trước nào về hành vi của trường như xấp xỉ biên độ dao động chậm. Phương pháp này cho phép mô phỏng và phân tích hiệu quả và mạnh mẽ các linh kiện ở kích thước nhỏ. Trong các linh kiện vi quang học, sự giam giữ quang học mạnh thường yêu cầu về kích thước của cấu trúc ở thang micro mét và một sự chênh lệch chiết suất nhất định đối với môi trường xung quanh vật dẫn. Các tham số cấu trúc như vậy có thể được mô hình hóa một cách hiệu quả sử dụng phương pháp FDTD [7].

2.2.1. FDTD solutions

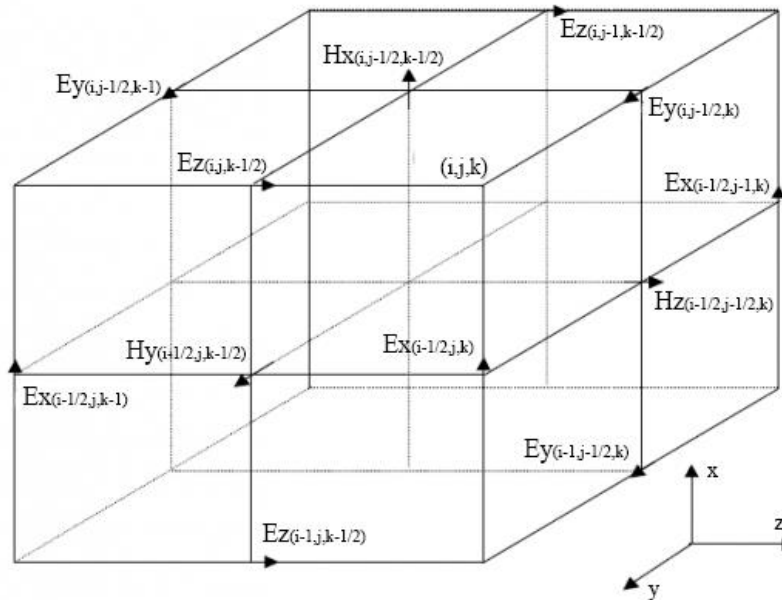
FDTD solutions là phần mềm sử dụng phương pháp FDTD để mô phỏng tính toán sự lan truyền ánh sáng trong các dạng cấu trúc dẫn sóng được phát triển bởi Lumerical - công ty phát triển phần mềm mô phỏng cho các linh kiện quang - điện tử. Phần mềm này cho phép mô hình hóa các cấu trúc ở dạng 2D và 3D.

Trong mô phỏng 2D, thiết bị quang tử được đặt trong mặt phẳng XZ, sóng ánh sáng lan truyền theo trục X, hướng Y không được tính đến. Giả định này loại bỏ tất cả các phép tính d/dy khỏi các phương trình Maxwell và chia chúng thành hai phương trình độc lập (TE và TM). Miền tính toán 2D được hiển thị trong Hình 3. Các bước không gian theo hướng X và Z lần lượt là Δx và Δz . Mỗi điểm lưới được liên kết với một loại vật liệu cụ thể và chứa thông tin về các tính chất của nó như chỉ số khúc xạ và các tham số tán sắc.



Hình 3: Miền tính toán 2D

Trong mô phỏng 3D, miền mô phỏng là một hộp hình khối, các bước không gian lần lượt là D_x , D_y và D_z theo các hướng x , y và z . Mỗi thành phần trường được trình bày bởi một mảng 3D - $E_x(i, j, k)$, $E_y(i, j, k)$, $E_z(i, j, k)$, $H_x(i, j, k)$, $H_y(i, j, k)$, $H_z(i, j, k)$. Vị trí các thành phần trường trong ô của Yee được hiển thị trong Hình 4.



Hình 4: Sự dịch chuyển của các thành phần vector điện, từ trường về một ô đơn vị khối của mạng không gian Yee

Hạn chế cơ bản của phương pháp FDTD là kích thước bước cả về thời gian và không gian. Các bước không gian và thời gian liên quan đến độ chính xác, độ phân tán số và tính ổn định của phương pháp FDTD. Nhiều tài liệu tham khảo và sách đã thảo luận về những vấn đề này. Nói chung, để giữ cho kết quả chính xác nhất có thể, với độ phân tán số thấp, kích thước mắt lưới thường được trích dẫn là 10 ô trên mỗi bước sóng, nghĩa là cạnh của mỗi ô phải ở mức $\lambda/10$ hoặc ít hơn ở tần số cao nhất (bước sóng ngắn nhất) [7].

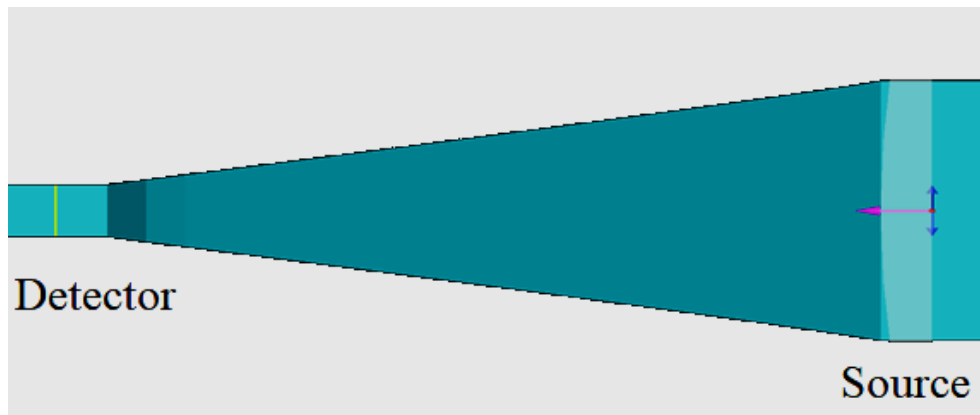
2.2.2. Mode solutions - bộ giải varFDTD 2.5D

Bộ giải varFDTD 2.5D mô tả chính xác sự lan truyền ánh sáng trong các hệ quang học tích hợp phẳng, từ các hệ thống dựa trên ống dẫn sóng đến các dạng hình học phức tạp hơn như tinh thể quang tử. Bộ truyền cho phép truyền phẳng (đa hướng) mà không có bất kỳ giả định nào về trục quang, cho phép các cấu trúc như bộ cộng hưởng vòng và khoang tinh thể quang tử được mô hình hóa một cách hiệu quả - các thiết bị được xử lý theo truyền thống với 3D FDTD. Bộ giải varFDTD có thể mô hình hóa các thiết bị ở quy mô hàng trăm micron một cách nhanh chóng.

Bộ giải varFDTD dựa trên việc thu gọn một hình dạng 3D thành một tập hợp các chỉ số hiệu quả 2D có thể được giải bằng 2D FDTD. Điều này hoạt động tốt nhất với các ống dẫn sóng được làm từ các cấu trúc phẳng vì giả định chính của phương pháp này là có rất ít khớp nối giữa các chế độ bản mỏng được hỗ trợ khác nhau. Đối với nhiều thiết bị, chẳng hạn như các cấu trúc ống dẫn sóng dựa trên SOI, chỉ hỗ trợ 2 chế độ dọc với các phân cực khác nhau [8].

2.3. Quá trình mô phỏng

Để khảo sát hệ số truyền dẫn của taper, hệ được mô phỏng như Hình 5 gồm một nguồn sáng (Source) có dạng phân bố Gaussian ở ống dẫn sóng có kích thước lớn hơn và một bộ thu được đặt tại vị trí ống dẫn sóng kích thước nhỏ.

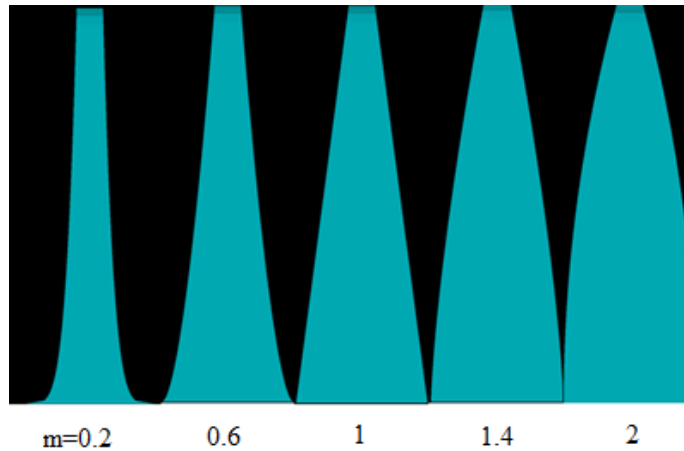


Hình 5: Mô hình tính toán hiệu suất dẫn sóng của cấu trúc taper

Vị trí của nguồn sáng được đặt cách đầu vào của taper $2 \mu\text{m}$, sóng ánh sáng phát ra là dạng Gaussian có bước sóng trung tâm $0,5 \mu\text{m}$. Tại phía đầu thu là một detector được đặt cách đầu nhỏ của cấu trúc taper khoảng $2 \mu\text{m}$, có nhiệm vụ đo ánh sáng truyền qua cấu trúc dẫn sóng nhỏ. Hiệu suất truyền dẫn qua cấu trúc taper được tính bằng tỷ lệ tín hiệu quang thu được ở vị trí detector trên tín hiệu ở nguồn.

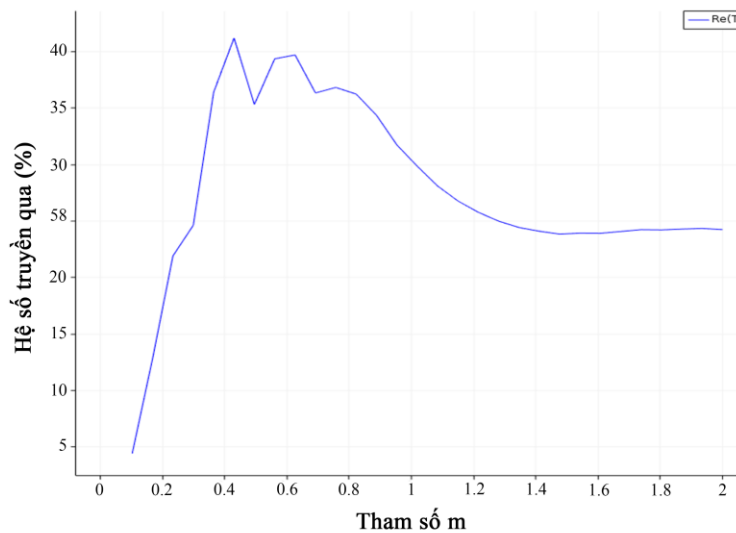
3. Kết quả và thảo luận

Trong quá trình khảo sát, chúng tôi đã thay đổi độ cong - m để mô phỏng tính toán hệ số truyền dẫn - T , từ đó có thể vẽ ra đồ thị sự thay đổi của hệ số truyền dẫn phụ thuộc vào độ cong mặt bên. Ảnh hưởng của tham số m đến biên dạng cấu trúc taper được thể hiện qua một số ví dụ ở Hình 6. Độ cong thay đổi từ $m = 0,2$ đến $m = 2$ cho ta thấy hình dạng của taper.



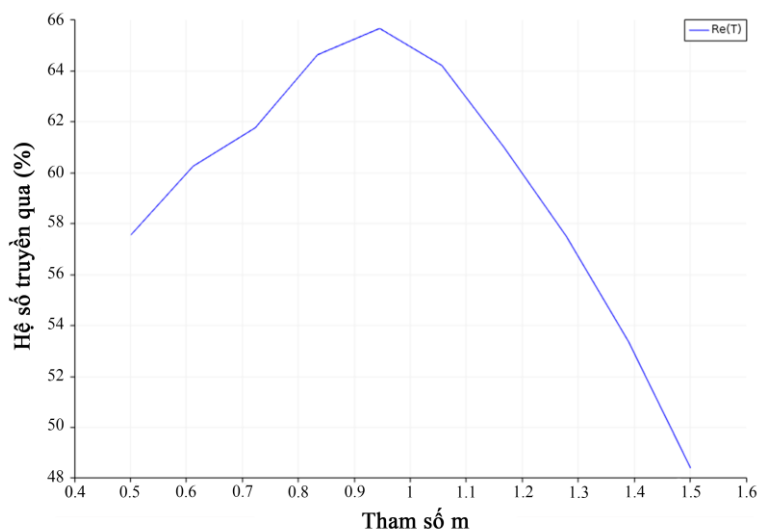
Hình 6: Biên dạng cấu trúc taper ứng với các tham số m khác nhau

Trong mô phỏng FDTD 2D (Hình 7), ta thấy sự bất ổn định ở vùng $0,4 \sim 0,6$, đó là việc hệ số truyền quang thay đổi bất thường với nhiều điểm cực đại khác nhau. Để giải thích hiện tượng này, ta cần xem xét lại sự khác biệt của mô phỏng FDTD 2D/3D. Trong mô phỏng FDTD 2D, ta giả thiết rằng một trục, ở đây là trục z , được xem là vô hạn. Như vậy, trong quá trình giải phương trình Maxwell, các thành phần d/dz bị loại bỏ, điều này làm cho sóng ánh sáng bị thiếu đi một thành phần. Chính vì vậy việc mô phỏng 2D không đủ chính xác, đó là nguyên nhân gây ra sự bất thường trong tính toán hệ số truyền dẫn.



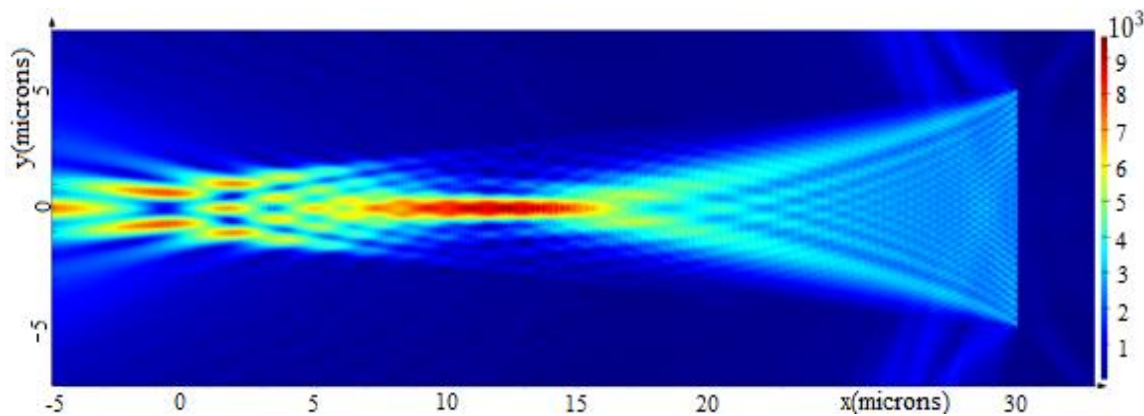
Hình 7: Sự thay đổi của hệ số truyền dẫn theo độ cong m - mô phỏng bằng FDTD solutions 2D

Để khắc phục điều này, chúng ta cần sử dụng mô phỏng FDTD 3D để tăng sự chính xác của mô phỏng. Tuy nhiên, việc mô phỏng 3D đồng nghĩa với việc số lượng tính toán nhiều hơn rất nhiều lần. Với việc mô phỏng bằng MODE solutions, ta thấy rằng hệ số truyền dẫn của taper thay đổi một cách liên tục theo độ cong của nó. Ban đầu, khi m tăng, hệ số truyền dẫn tăng. Bằng những mô phỏng chi tiết hơn trong vùng $m = 0,9$ đến 1 , ta tìm được một điểm cực đại duy nhất tại $m = 0,94$.



Hình 8: Sự thay đổi của hệ số truyền dẫn theo độ cong m - mô phỏng bằng *MODE solutions*

Hình 9 là giản đồ về phân bố trường điện từ khi cho ánh sáng truyền qua với $m = 0,94$. Ta thấy rằng, tại gần cổng vào và cổng ra của taper, lượng ánh sáng bị hao tổn ra ngoài là nhiều nhất.



Hình 9: Phân bố trường điện từ của hệ taper ($m=0,94$)

4. Kết luận

Cấu trúc dẫn sóng taper có vai trò quan trọng cho các ứng dụng truyền dẫn quang hiệu suất cao. Thiết kế một cấu trúc dẫn sóng như vậy yêu cầu kích thước nhỏ và hiệu suất dẫn sóng cao. Bằng việc sử dụng phương pháp FDTD, một cấu trúc dẫn sóng dạng vuốt thon - taper đã được mô hình hóa. Kết quả mô phỏng đã đưa ra được sự thay đổi hệ số truyền dẫn của taper phụ thuộc vào biên dạng của cấu trúc. Tại giá trị tham số $m = 0,94$ hệ số truyền dẫn đạt giá trị lớn nhất, đạt xấp xỉ 66%. Kết quả này bước đầu có ý nghĩa định hướng cho việc chế tạo để đạt được một cấu trúc taper với hiệu suất dẫn sóng cao.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2018-PC-128.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Huanran Wang et al., “Three dimensional polymer waveguide using hybrid lithography”, *Applied Optics* 54.28: 8412-8416, 2015.
- [2] Jitesh J. Shewale, and Kiran S. Bhole, “3D polymer microneedle array: Fabrication and analysis”, *Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE), 2015 International Conference on*, IEEE, 2015.
- [3] Muhammad Rodlin Billah et al., “Multi-chip integration of lasers and silicon photonics by photonic wire bonding”, *CLEO: Science and Innovations*, Optical Society of America, 2015.
- [4] Oscar A. Jimenez Gordillo et al., “3D photonic structure for plug-and-play fiber to waveguide coupling”, *CLEO: Science and Innovations*, Optical Society of America, 2018.
- [5] Xu Xiao, Lin Ma and Zuyuan He, “3D polymer directional coupler for on-board optical interconnects at 1550 nm”, *Optics Express* 26.13: 16344-16351, 2018.
- [6] Kevin Kruse and Christopher T. Middlebrook, “Polymer taper bridge for silicon waveguide to single mode waveguide coupling”, *Optics Communications* 362: 87-95, 2016.
- [7] <https://optiwave.com/optifdtd-manuals/fdtd-fdtd-basics/>
- [8] https://apps.lumerical.com/pic_passive_tapers_soi.html

SUMMARY

DESIGN A POLYMER-BASED TAPER FOR INTERGRATED OPTICAL CIRCUITS

To guide an optical signal into an integrated optical circuit, small optical paths, which have a diameter about 2 μm , must be used. Conventional fibers are larger in size - about 10 μm . Therefore we need a tapered structure to connect these types of optical paths. We found that transmission efficiency of taper depending on the parameters as length, curvature on either side, upper curve, etc... In this report, we focus only on the influence of the lateral curvature on the taper transmission coefficient.

Key words: Integrated optical; wave structure; tapered structure.