

사각 나선형 박막 인덕터의 GHz 대역 특성

김지원* · 조순철

숭실대학교 전자공학과
서울특별시 동작구 상도 5동 1-1, 156-743

(2004년 1월 19일 받음, 2004년 2월 20일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 GHz 대역의 박막 인덕터 특성을 수치해석 하였다. 인덕터의 기본 구조는 $390\ \mu\text{m} \times 390\ \mu\text{m}$, 5.5턴(turn), 선폭 $10\ \mu\text{m}$ 와 선간격 $10\ \mu\text{m}$ 의 사각 나선형이다. 주파수 특성은 10 GHz까지 시뮬레이션 하였다. 기판은 Si, Sapphire, 유리와 GaAs를 모델로 하였고 도체는 Cu이다. 도체의 두께는 $2\ \mu\text{m}$ 로 고정하였다. 입력과 출력단자의 위치가 서로 반대가 되도록 하기 위하여 턴수는 n.5로 하였다. 기본 구조 인덕터는 초기 인덕턴스 13.0 nH, 최대 인덕턴스 60.0 nH 그리고 공진주파수는 4.25 GHz이었다. 기판의 유전상수가 증가하면 초기 인덕턴스는 거의 변화가 없으나 공진 주파수는 감소하였다. 인덕터의 턴수를 1.5에서 9.5로 변화시키면, 초기 인덕턴스는 2.9 nH며 16.9 nH로 포화되었으며 Q factor는 소폭 증가하였다. 인덕터의 선폭과 선간격을 증가시키면 초기와 최대 인덕턴스는 감소하였다. 공진 주파수는 증가하였으며, Q factor는 선폭과 선간격을 증가시키면 각각 증가와 감소를 나타내었다.

주제어 : GHz 대역, 인덕터, 공진 주파수, 인덕턴스, 유전상수

I. 서 론

최근의 반도체 제조기술의 급속한 발달로 인하여 시스템의 소형화·경량화의 추세가 증가하고 있다. 특히 휴대용 전화기, PCS 등 정보통신기기의 소형화 및 경량화의 추세가 두드러지게 나타나고 있다. 또한 각종 부품의 동작 가능 주파수 대역이 종전의 kHz 또는 MHz 대역에서 GHz 대역으로 옮겨지고 있는 추세에 있다[1-3].

이러한 추세 중 인덕터의 소형화·경량화 기술은 반도체 제조기술을 이용해 실리콘기판 등의 위에 평면 모양의 코일을 만드는 박막 인덕터가 이용되고 있다. 그러나 종전의 박막 인덕터는 그 동작 주파수 대역이 수백 kHz, 또는 수백 MHz이었다. 지금까지는 공심 형태의 나선 인덕터를 주로 해석하여 왔으며, 높은 인덕턴스와 Q factor 값을 얻기 위해서 많은 턴수를 필요로 하였다. 이로 인하여 공진 주파수의 감소를 초래하였고, 실제로 사용할 수 있는 공진 주파수 이하의 영역 또한 MHz 대역에 국한되었다. 이를 해결하기 위하여 자성박막을 사용하려는 시도가 꾸준히 이루어져 왔으나 아직까지는 큰 성과가 없는 실정이다[4-8].

본 연구에서는 GHz 대역에서 안정적으로 사용할 수 있는 인덕터의 구현을 위하여 공심 상태의 박막 인덕터를 GHz 대역에서 해석하여, 자성 박막을 사용한 인덕터 구현에 필요한 기초 자료를 제시하고자 한다. 박막 인덕터의 주파수 해석 범위를 10 GHz까지로 하였으며 구조는 사각 나선 구조를 택하

여 그 특성을 분석하였다.

II. 모의실험방법

최근 박막 인덕터는 그 활용범위가 초고주파 영역까지 확대되어 활발히 연구되고 있다. 이러한 박막 인덕터의 활용범위가 초고주파 영역으로 확대됨에 따라 특성분석 방법에 초고주파해석 기법을 사용하여야 된다고 판단하여 수치 해석적인 방법으로 그 특성을 분석하였다.

그림 1은 주파수에 따른 박막 인덕터의 동작특성을 나타낸 것이다. 여기서 인덕턴스는 박막 인덕터의 임피던스의 허수부를 각주파수 ω 로 나눈 값으로 정의된다. 박막 인덕터의 동작 특성은 크게 3영역으로 나눌 수 있다. 영역 I은 인덕터의 특성을 나타내는 영역으로 사용 가능한 영역이며, 영역 II는 천이영역으로써 인덕터의 특성에서 커패시터의 특성으로 바뀌는 영역이다. 이 영역에는 인덕턴스가 0이 되는 주파수를 포함하고 있으며, 이 주파수를 공진 주파수라 부른다. 이 주파수 이상에서의 인덕터의 특성은 유도성 리액턴스에서 용량성 리액턴스로 바뀌게 된다. 영역 III은 커패시터의 특성을 나타내는 영역으로 사용할 수 없는 영역이다.

그림 2는 수치해석에 사용한 인덕터 구조를 나타낸 것으로 전체 크기 $390\ \mu\text{m} \times 390\ \mu\text{m}$ 에 선폭 $10\ \mu\text{m}$, 선간격 $10\ \mu\text{m}$ 의 사각 나선형을 기본으로 턴수, 선폭과 선간격을 변화시키며 설계하였다. 인덕터의 턴수는 입력단과 출력단의 위치가 서로 반대가 되도록 하기 위하여 n.5 턴이 되도록 설계하였다. 인덕터 내부 도선과의 연결은 air bridge 형태를 택하였다. 이

*Tel: (02)815-6471, E-mail : jwkim@engineer.ssu.ac.kr

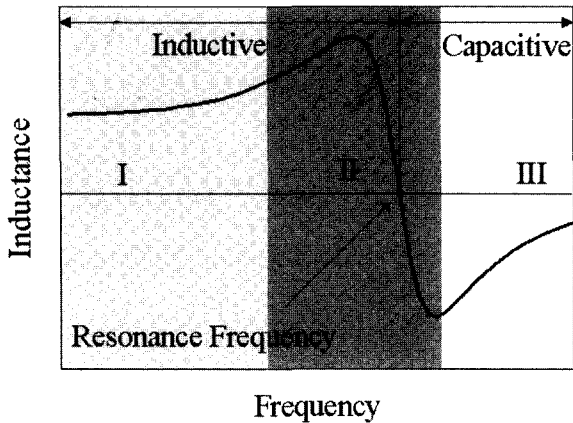


Fig. 1. Operational regions of a typical inductor.

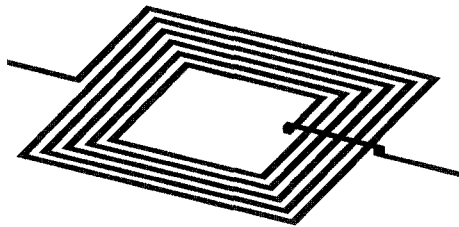


Fig. 2. Layout of square spiral inductor and air bridge.

모의실험에 사용한 기판은 Si, Spaphire, 유리와 GaAs기판이며, 도체는 Cu이다.

인덕터 해석은 RF 수치해석에 널리 사용되는 MoM(Method of Moment) 방법과 FFS(Fast Frequency Sweep)를 이용한 프로그램을 사용하였다.

Q factor 계산은

$$Q = \frac{\text{Im}(Y_{11})}{\text{Re}(Y_{11})}$$

를 이용하였으며, $\text{Im}(Y_{11})$ 은 입력 어드미턴스의 허수부분이고, $\text{Re}(Y_{11})$ 은 입력 어드미턴스의 실수부분이다[9].

III. 모의실험 결과 및 고찰

3.1. 기판 종류 변화에 따른 특성

인덕터의 전체 크기를 $390 \mu\text{m} \times 390 \mu\text{m}$, 선폭 $10 \mu\text{m}$, 선간격 $10 \mu\text{m}$ 과 턴수를 5.5 턴으로 고정하고 사용된 기판의 종류를 변화시키며 고주파 특성을 분석하였다. 사용한 기판의 종류는 두께 $700 \mu\text{m}$ 의 Si, 유리기판(Corning 7059), Sapphire와 GaAs이며, 이들의 유전상수는 각각 11.8, 5.8, 9.4와 13.1이다.

그림 3은 기판 종류에 따른 초기 인덕턴스와 공진 주파수를 나타낸 것으로 여기서 초기 주파수는 저주파수인 100 MHz

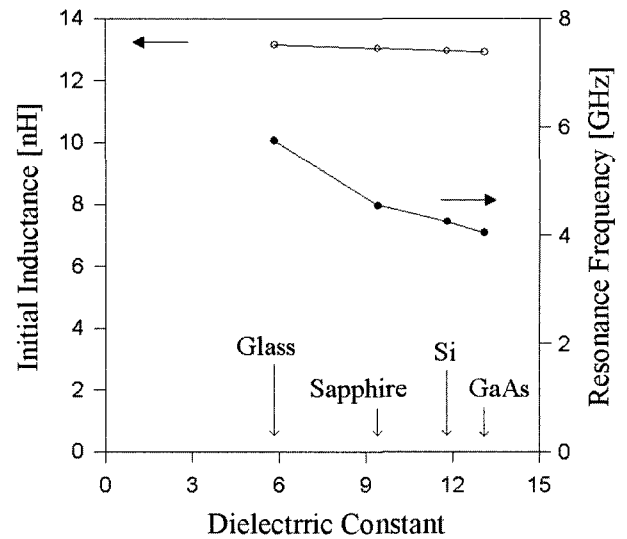


Fig. 3. Initial inductance and resonance frequency versus varying substrate dielectric constant of spiral inductors.

이다. 초기 인덕턴스의 경우 SiO_2 기판은 13.2 nH, 유리 기판은 13.2 nH, Sapphire 기판은 13.0 nH 그리고 Si 기판은 13.0 nH로 거의 변화가 없었다. 그러나 공진 주파수의 경우 유리 기판은 5.75 GHz, Sapphire 기판은 4.55 GHz, Si 기판은 4.25 GHz 그리고 GaAs 기판은 4.05 GHz로 큰 변화를 보였다. 기판 유전상수의 변화는 소자의 인덕턴스에 직접적인 영향을 주기보다는 오히려 소자의 전기용량에 영향을 주어 공진 주파수의 변화에 큰 기여를 하는 것으로 생각된다. 즉 기판의 유전상수가 증가하면 소자의 전기용량은 증가하지만 인덕턴스는 거의 변화가 없어 이로 인하여 공진 주파수는 감소하게 된다.

3.2. 기판 두께 변화에 따른 특성

인덕터의 전체 크기를 $390 \mu\text{m} \times 390 \mu\text{m}$, 선폭 $10 \mu\text{m}$, 선간격 $10 \mu\text{m}$ 과 턴수를 5.5 턴으로 고정하고 사용된 각 기판의 두께를 변화시키며 고주파 특성을 분석하였다. 사용한 기판의 종류는 Si, 유리와 Sapphire이다.

그림 4의 (a)는 기판의 종류에 따른 초기 인덕턴스를 나타낸 것으로 초기 인덕턴스의 경우 기판의 종류에 관계없이 같은 두께에서 거의 동일한 값을 나타내었다. 그리고 기판의 두께 $300 \mu\text{m}$ 이하에서는 두께가 감소할수록 초기 인덕턴스가 작아지는 것을 알 수 있었다. 그림 4의 (b)에 나타낸 공진 주파수의 경우 기판의 두께가 감소하면 공진 주파수는 감소하였으며, 이는 기판 두께의 감소로 인하여 내부 전기용량이 증가하였기 때문이다. 또한 기판의 유전상수가 크면 공진 주파수가 작았다. 공진 주파수 차이는 두께가 변하여도 일정하게 유지되었다.

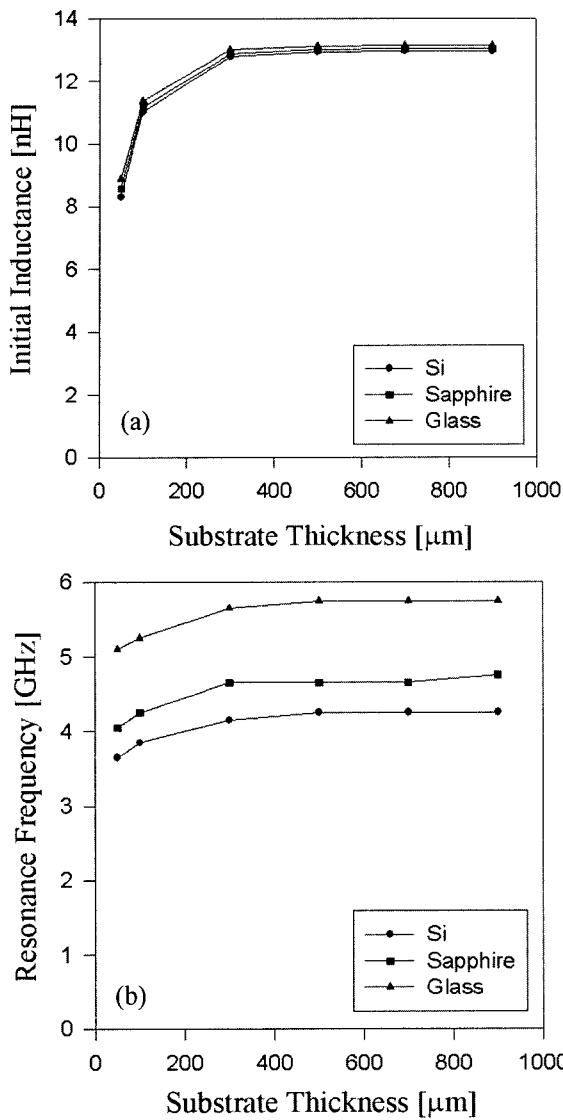


Fig. 4. Initial inductance and resonance frequency versus varying substrate thickness of spiral inductors.

3.3. 나선 inductor의 턴수 변화에 따른 특성

인덕터의 전체 크기를 $390 \mu\text{m} \times 390 \mu\text{m}$, 선폭 $10 \mu\text{m}$ 과 선간격 $10 \mu\text{m}$ 으로 고정하고 턴수를 1.5 턴에서 9.5 턴까지 변화시키며 고주파 특성을 분석하였다.

그림 5은 인덕터 각 턴수에서의 주파수 변화에 따른 인덕턴스를 나타낸 것으로 주파수는 10 GHz까지 분석하였다. 주파수 변화에 따른 인덕턴스는 그림 5과 같은 변화를 보였다. 그림 6과 7은 그림 5로부터 얻은 결과이다.

그림 6은 인덕터의 턴수 변화에 따른 초기 인덕턴스와 공진 주파수를 나타낸 것이다. 초기 인덕턴스의 경우 1.5 턴부터 7.5 턴까지는 2.9 nH에서 15.9 nH로 급격히 증가하다가, 9.5 턴까지는 16.9 nH로 증가폭이 감소하여 포화되는 형태가 되었다. 이는 사각 나선 인덕터의 경우 인접한 도체에 흐르는

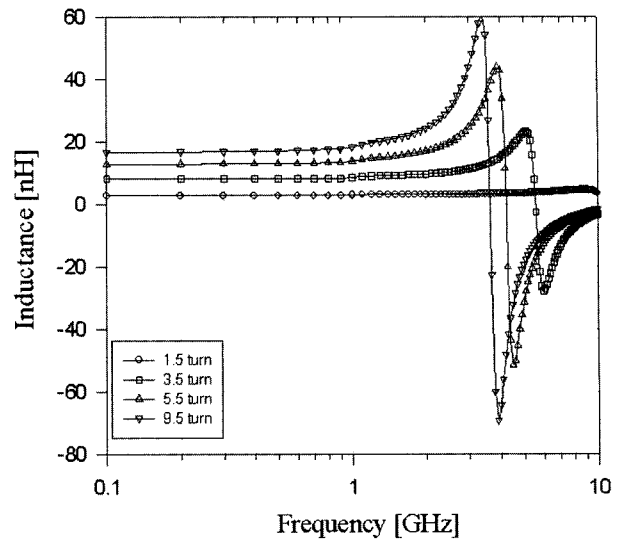


Fig. 5. Inductance versus frequency of spiral inductors for varying turns.

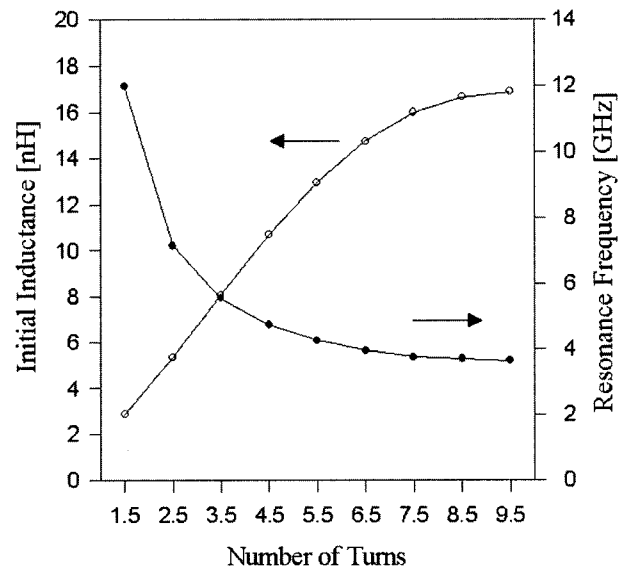


Fig. 6. Initial inductance resonance frequency versus varying turns of spiral inductors.

전류의 방향이 같기 때문에 인접한 도체간의 상호 인덕턴스가 전체 인덕턴스에 대하여 (+)의 값을 가지기 때문이다[10]. 그러나 인덕터 내부로 턴수를 증가시킴에 따라 중앙에 위치하는 도선간의 거리가 가까워진다. 가까워진 중앙 도선의 전류 방향은 반대로 흐르기 때문에 전체 인덕턴스에 대한 상호 인덕턴스의 기여도가 감소하게 되기 때문이다. 공진 주파수는 1.5 턴에서 4.5 턴까지는 12.00 GHz에서 4.75 GHz로 급격히 감소하다가, 9.5 턴까지는 3.65 GHz로 감소폭이 감소하여 포화되는 형태가 되었다. 나선형 인덕터의 턴수가 증가하면 인덕턴스가 증가하게 되고 공진 주파수는 감소하게 된다.

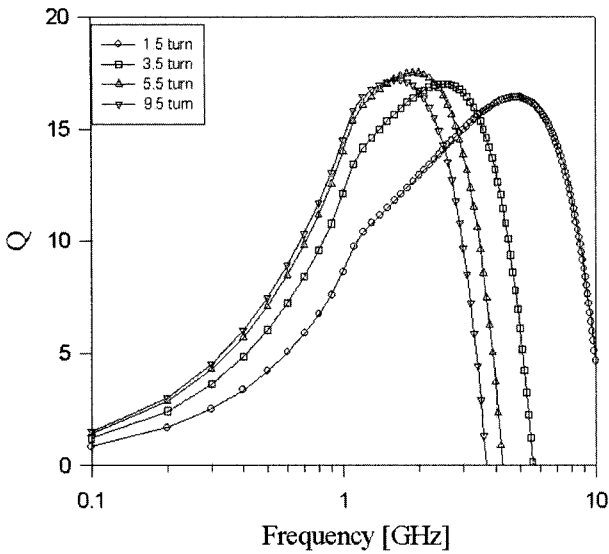


Fig. 7. Q factor versus varying turns of spiral inductors.

그림 7은 인덕터의 턴수 변화에 따른 Q factor를 나타낸 것이다. 초기 Q factor의 경우 1.5 턴부터 9.5 턴까지 0.8에서 1.5로 약 2배 증가하였으나, 최대 Q factor는 16.4에서 17.5로 증가폭이 매우 작게 나타났다. 이는 턴수의 증가에 따른 인덕턴스는 증가하였으나 저항 또한 증가 하였기 때문이다. 그리고 최대 Q 값을 가지는 주파수는 1.5 턴에서 4.5 턴까지 4.80 GHz에서 2.10 GHz까지 급격히 감소하였으며 9.5 턴까지는 1.60 GHz로 소폭 감소하였다.

3.4. 나선 inductor의 선폭 변화에 따른 특성

전체 인덕터의 크기를 $390\ \mu\text{m} \times 390\ \mu\text{m}$, 도체의 선간격은 $10\ \mu\text{m}$ 으로 턴수를 5.5 턴으로 일정하게 하고 선폭 변화시키며 고주파 특성을 분석하였다.

그림 8은 인덕터의 도체 선폭 변화에 따른 인덕턴스를 10 GHz까지 분석한 것이다. 그림 9와 10은 그림 8로부터 얻은 결과이다.

그림 9는 인덕터 도체 선폭 변화에 따른 초기 인덕턴스와 공진 주파수를 나타낸 것이다. 초기 인덕턴스의 경우 선폭을 $5\ \mu\text{m}$ 에서 $20\ \mu\text{m}$ 까지 변화시켰을 때 17.4 nH에서 7.3 nH로 감소하였다. 반면 공진 주파수는 3.75 GHz에서 5.55 GHz로 증가하였다. 이는 인덕터 도체의 선폭이 증가하여도 전체 인덕터 크기와 턴수 및 도선 간격이 일정하므로 내부 사각 코일의 도선 면적이 점점 작아지게 되어 각각의 자기 인덕턴스가 감소하였기 때문이다. 또한 전류의 방향이 반대인 도선이 근접하게 되어 이들 간의 상호 인덕턴스 또한 감소하여 전체 인덕턴스가 감소한 것이다[10]. 전체 인덕턴스의 감소는 공진 주파수를 증가시키게 된다.

그림 10은 인덕터 도체의 선폭 변화에 따른 Q factor를

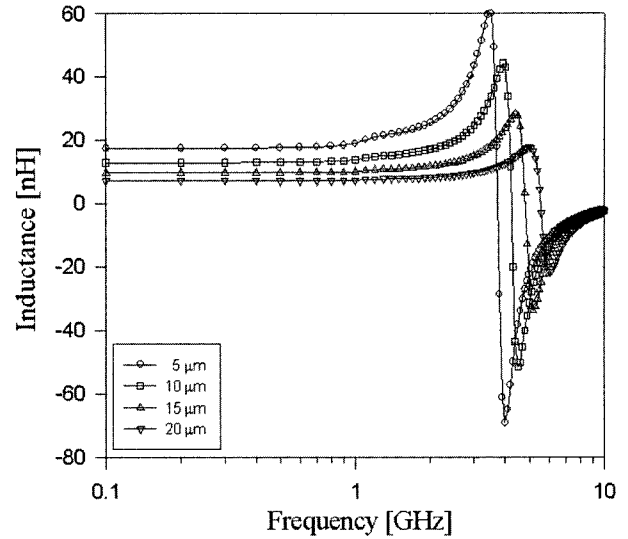


Fig. 8. Inductance versus frequency of spiral inductors for varying line width.

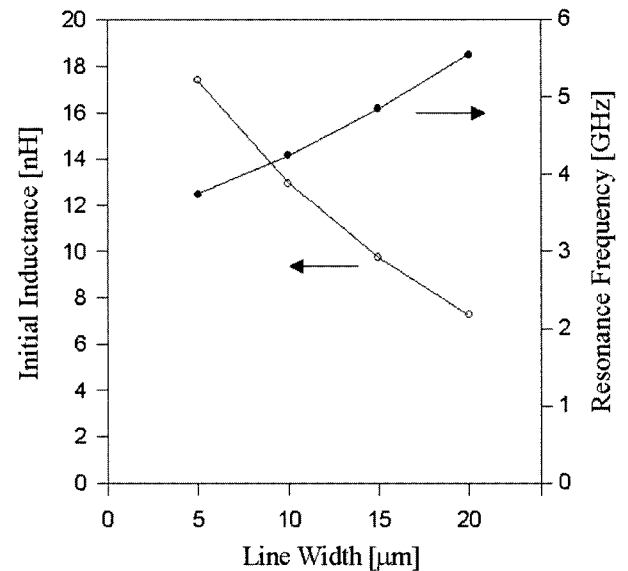


Fig. 9. Initial inductance and resonance frequency versus varying line width of spiral inductors.

나타낸 것이다. 초기 Q factor의 경우 0.87에서 2.02로, 최대 Q factor는 10.40에서 21.20로 약 2배씩 증가하였다. 그리고 최대 Q 값을 가지는 주파수는 선폭 $5\ \mu\text{m}$ 와 $20\ \mu\text{m}$ 에서 1.70 GHz와 2.30 GHz로 소폭 증가하였다. 이는 인덕터 선폭의 증가에 따른 인덕턴스의 감소보다 저항의 감소가 더 크게 작용한 것이라 사료된다.

3.5. 나선 inductor의 선간격 변화에 따른 특성

전체 인덕터의 크기를 $390\ \mu\text{m} \times 390\ \mu\text{m}$, 도체의 선폭은 $10\ \mu\text{m}$ 으로 턴수를 5.5 턴으로 일정하게 하고 선간격을 변화시키

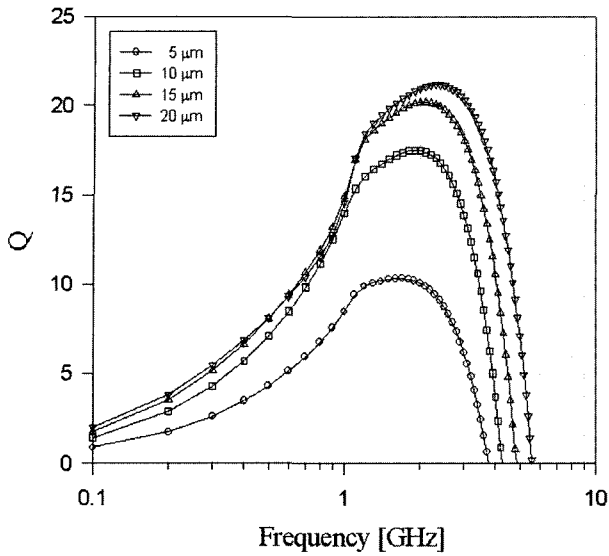


Fig. 10. Q factor versus varying line width of spiral inductors.

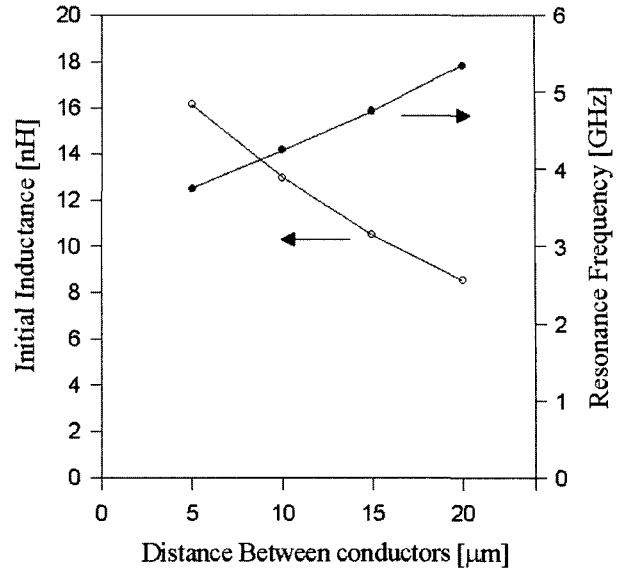


Fig. 12. Initial inductance and resonance frequency versus varying distance between conductors of spiral inductors.

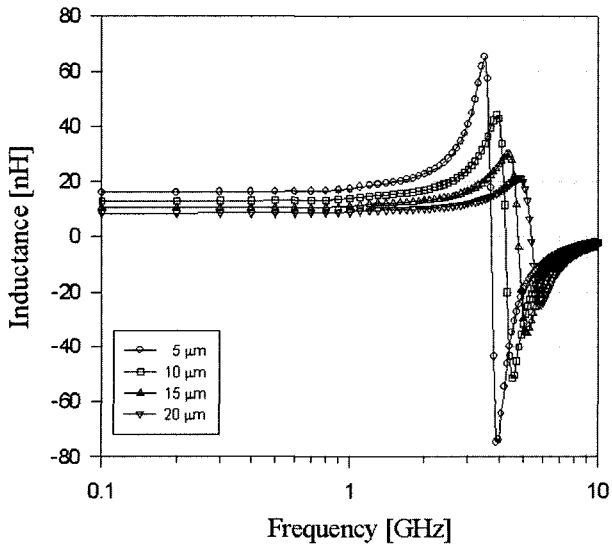


Fig. 11. Inductance versus frequency of spiral inductors for varying distance between conductors.

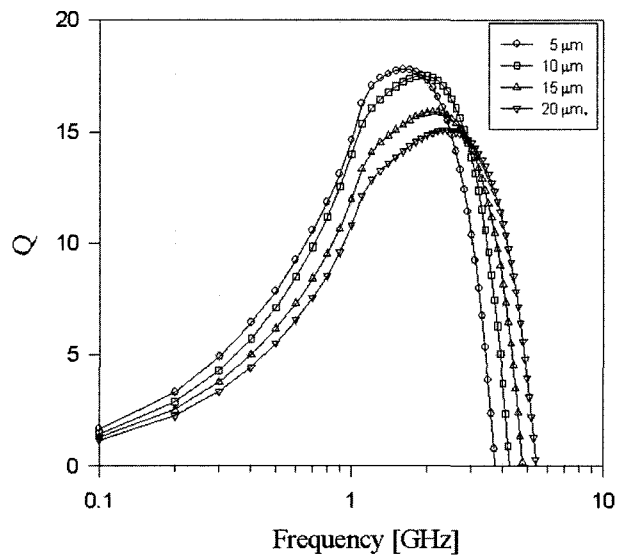


Fig. 13. Q factor versus varying distance between conductors of spiral inductors.

며 고주파 특성을 분석하였다.

그림 11은 인덕터의 도체 선간격 변화에 따른 인덕턴스를 10 GHz까지 분석한 것이다. 그림 12와 13은 그림 11로부터 얻은 결과이다.

그림 12는 인덕터의 도체 선간격 변화에 따른 초기 인덕턴스와 공진 주파수를 나타낸 것이다. 초기 인덕턴스의 경우 선간격을 5 μm에서 20 μm까지 변화시켰을 때 16.1 nH에서 8.5 nH로 감소하였다. 공진 주파수는 3.75 GHz에서 5.35 GHz로 증가하였다. 인덕턴스의 감소는 나선 인덕터의 경우 도체 선간격이 증가하면 내부 사각 코일의 도선 면적이 작아지게 되어 각각의 자기 인덕턴스가 감소하고, 이들 간의 상호 인덕턴스

또한 전류의 방향이 같은 이웃 도선간의 거리가 증가하기 때문에 감소하여 전체 인덕턴스가 감소한 것이다. 또한 전체 인덕턴스의 감소는 공진 주파수를 증가시키는 효과를 나타낸다.

그림 13은 인덕터의 도체 선간격 변화에 따른 Q factor를 나타낸 것이다. 초기 Q factor의 경우 1.66에서 1.13, 최대 Q factor는 17.80에서 15.10으로 소폭 감소하였다. 그리고 최대 Q 값을 가지는 주파수는 선간격 5 μm와 20 μm에서 1.60 GHz와 2.40 GHz로 소폭 증가하였다. 이는 인덕터의 도체 선간격의 증가에 따른 저항의 감소보다 인덕턴스의 감소가 더 크게 작용한 것이라 사료된다.

IV. 결 론

사각 나선형 공심 인덕터의 GHz 대역에서 특성을 전체 크기 $390\ \mu\text{m} \times 390\ \mu\text{m}$, 5.5 턴, 선폭 $10\ \mu\text{m}$ 그리고 선간격 $10\ \mu\text{m}$ 을 기본 구조로 설계하고 해석하였다. 사각 나선 인덕터의 턴수, 선 간격과 선 폭을 변화시키며 구조 변경에 따른 특성을 해석하였다. 기본구조의 초기 인덕턴스 $13.0\ \text{nH}$, 최대 인덕턴스 $60.0\ \text{nH}$ 그리고 공진주파수는 $4.25\ \text{GHz}$ 이었다. 최대 Q factor는 $1.80\ \text{GHz}$ 에서 17.50 이었다.

- 범용으로 많이 사용하는 기판의 두께인 $500\ \mu\text{m}$ - $700\ \mu\text{m}$ 사이의 기판에서는 종류에 변화에 관계없이 초기 인덕턴스는 큰 변화를 나타내지 않았다. 그러나 기판의 유전상수가 증가하면 공진 주파수는 감소하였다. 이는 기판의 유전상수 증가가 전체 인덕턴스에 직접적인 영향을 주기보다는 전기용량 변화에 더큰 영향을 주는 것으로 사료된다.
- 사각 나선 인덕터의 턴수를 1.5에서 7.5 턴으로 증가시키면 초기 인덕턴스는 $2.9\ \text{nH}$ 에서 $15.9\ \text{nH}$ 로, 최대 인덕턴스는 $4.6\ \text{nH}$ 에서 $57.2\ \text{nH}$ 로 급격히 증가한 후 9.5 턴까지는 각각, $16.9\ \text{nH}$ 와 $60.1\ \text{nH}$ 로 포화되는 경향을 보였다. 반면 공진 주파수는 $12.00\ \text{GHz}$ 에서 $3.65\ \text{GHz}$ 로 감소하였다. 최대 Q factor는 16.40 에서 17.50 로 소폭 증가하였다.
- 도체의 선폭과 선간격을 증가시키면 초기 인덕턴스는 각각 $17.4\ \text{nH}$ 에서 $7.3\ \text{nH}$ 로, $16.1\ \text{nH}$ 에서 $8.5\ \text{nH}$ 로 급격히 감소하였다. 최대 인덕턴스 또한 $59.8\ \text{nH}$ 에서 $17.7\ \text{nH}$ 로, $65.5\ \text{nH}$ 에서 $21.3\ \text{nH}$ 로 급격히 감소하였다. 반면 공진 주

파수는 각각 $3.75\ \text{GHz}$ 에서 $5.35\ \text{GHz}$ 로, $3.75\ \text{GHz}$ 에서 $5.55\ \text{GHz}$ 로 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Yorgos K. Koutsoyannopoulos and Yannis Papananos, IEEE Trans. Circuits and Systems, **47**(8), 699(2000).
- [2] M. Yamaguchi, Makoto Baba, and Ken-Ichi Arai, IEEE Trans. MTT, **49**(12), 2331(2001).
- [3] Hongrui Jiang, Ye Wang, Jer-Liang Andrew Yeh, and Norman C. Tien, IEEE Trans. MTT, **48**(12), 2415(2000).
- [4] M. Yamaguchi, M. Baba, K. Suezawa, T. Moizumi, K. I. Arai, A. Haga, Y. Shimada, S. Tanabe, and K. Itoh, IEEE Trans. Mag, **36**(5), 3495(2000).
- [5] M. Yamaguchi, K. Suezawa, M. Baba, K. I. Arai, Y. Shimada, S. Tanabe, and K. Itoh, IEEE Trans. Mag, **36**(5), 3514(2000).
- [6] A. Gromov, V. Korenivski, K. V. Rao, R. B. van Dover, and P. M. Mankiewich, IEEE Trans. Mag, **34**(4), 1246(1998).
- [7] T. Inoue, K. Nishijima, Yatabe, S., Mizoguchi, T. Sato, IEEE Trans. Mag, **34**(4), 1372(1998).
- [8] V. Korenivski and van R. B. Dover, IEEE Trans. Mag, **34**(4), 1375(1998).
- [9] Kenneth O, IEEE J. Solid-State Circuits, **33**(8), 1249(1998).
- [10] 김영학, 송재성, 한국자기학회지, **6**(3), 179 (1996).

GHz Bandwidth Characteristics of Rectangular Spiral type Thin Film Inductors

J. Kim* and S. Jo

School of Electronic Engineering, Soongsil University 1-1, Sangdo-5Dong, Dongjak-Ku, Seoul 156-743, Korea

(Received 19 January 2004, in final from 20 February 2004)

In this research, characteristics of air core rectangular spiral type inductors of GHz band are numerical analyzed. The basic structure of inductors is a rectangular spiral having $390\ \mu\text{m} \times 390\ \mu\text{m}$ size, 5.5 turns, line width of $10\ \mu\text{m}$ and line space of $10\ \mu\text{m}$. Frequency characteristics were simulated up to 10 GHz. The substrate was modeled as Si, Sapphire, glass and GaAs and the conductor as Cu. The thickness of the conductor was fixed at 2. The number of turns was n.5 to make the input and output terminals to be on the opposite sides. The initial inductance of the basic inductor structure was 13.0 nH, maximum inductance 60.0 nH and resonance frequency 4.25 GHz. As the dielectric constant of the substrate was increased, the initial inductance varied only slightly, but the resonance frequency decreased considerably. As the number of turns was varied from 1.5 to 9.5, the initial inductance was increased linearly from 2.9 nH to 15.9 nH and, then, saturated at 16.9 nH. The Q factor increased only slightly. The line width and line space of inductors were varied from $5\ \mu\text{m}$ to $20\ \mu\text{m}$, which resulted in the decrease of the initial and maximum inductances. But the resonance frequency was increased. Q factor displayed an increase and a decrease, respectively, when the line width and line space were increased.

Key words: GHz bandwidth, inductor, resonance frequency, inductance, dielectric constant